

P0009/05B

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique.  
Département d'Hydraulique

## Projet de Fin d'Etudes

Thème :

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

# Application du modèle hydrologique HEC-HMS sur le bassin versant de Sidi Bel Abbas

Soutenu par :  
Melle Kahina LEFFAD

Proposé par:  
Mme Saadia BENMAMAR

Dirigé par :  
Mme S.BENMAMAR  
Mr S.BENZIADA

Promotion 2004/2005.

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

*Je dédie ce travail à :*

- . Mes très chers parents ma mère qui m'a encouragé et mon père qui a toujours cru en moi;*
- . Mes frères et sœur, à toute ma famille ;*
- . Tous mes amis et amies.*

## Remerciements

Tout d'abord, Je remercie Mme S. BENMAMAR de m'avoir fait l'honneur d'être ma promotrice et surtout de travailler avec elle. Je suis très reconnaissante pour sa disponibilité, pour son écoute, ainsi que pour sa confiance pour bien mener ce travail.

Je remercie mon copromoteur Monsieur S.BENZLADA d'avoir été disponible pour les difficultés rencontrées ainsi que son encouragement dans le travail et surtout les moments d'écoutes et de besoins.

J'adresse ma profonde reconnaissance aux personnels de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydraulique) d'Alger, qui m'ont chaleureusement accueilli et permit d'effectuer ce travail, sans leurs données hydrologique, ce travail n'aura jamais avancé. Particulièrement Mme L. SERIDI ABDA qui a été disponible tout au long de cette période et qui m'as fait l'honneur de participer dans le jury.

Je remercie Monsieur M.BELABBES, Ingénieur à l'ANRH pour son aide et particulièrement de m'avoir appris à utiliser les systèmes d'informations géographiques.

Je remercie Monsieur O. BELHADJ de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Je remercie aussi Monsieur N. NEBBACHE d'avoir accepter d'être membre du jury particulièrement pour son aide, ses encouragements et son soutien moral.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur Y. MOULOUDI. Il a su m'entendre, conseiller, et aider dans des moments très durs. Je le remercie pour son soutien moral, son encouragement, sa compréhension, sa disponibilité, et son suivi dans ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Mr H. HENINE de m'avoir encourager à avancer, c'est grâce à son aide de loin que j'ai pu appliquer le HEC-HMS et qui a résolu toutes les difficultés que j'avais dans l'application et surtout d'avoir était disponible, malgré la distance.

Je tiens aussi à remercier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation particulièrement ceux du département d'Hydraulique, de m'avoir donner la chance d'apprendre, et de nous faire partager leurs savoirs, sans eux je ne serai jamais arriver à ce stade.

Je remercie également le directeur du laboratoire Mr le professeur A.KETTAB, du laboratoire de recherche scientifique (LRS) de l'école, d'avoir mis à notre disposition le matériel nécessaire, afin d'effectuer ce projet et de le faire dans de bonnes conditions.

Je remercie toutes personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail de près ou de loin.

## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Présentation du bassin versant de Sidi Bel Abbas</b>	
Introduction .....	2
I. Etude géographique du bassin versant de la Mekerra .....	2
II. Rappel sur la situation hydrométéorologique .....	3
a. Situation climatologique .....	3
b. Situation géographique des stations pluviométriques .....	3
c. Températures .....	4
d. Les vents .....	5
e. Les précipitations .....	5
f. Situation hydrométriques .....	6
III. Brouillard, Humidité, Evaporation .....	8
IV. Autres caractéristiques .....	8
a. Géologie générale .....	8
b. Sols .....	8
c. Végétations .....	9
d. Hydrographie .....	9
Conclusion .....	10
<b>Chapitre II : Modèles hydrologiques</b>	
Introduction .....	11
I. Variables et paramètres d'un modèle hydrologique .....	11
II. Pourquoi un modèle hydrologique .....	12
III. Différentes approches de la modélisation .....	13
IV. Présentation de quelques modèles .....	16
1. Critère de sélection .....	16
2. Modèle global IHACRES .....	16
3. Modèles semi spatialisés .....	17
4. Modèle physique spatialisé MIKE SHE .....	21
5. Modèle physique conceptuel semi spatialisé TOPMODEL .....	23
6. Le modelé HYDROTEL .....	24
Conclusion .....	25
<b>Chapitre II : Présentation du HEC-HMS</b>	
Introduction .....	26
I. Modèle de bassin .....	26
I.1 Création d'un nouveau modèle de bassin .....	26
I.2 Les éditeurs d'éléments .....	27
a. Modélisation des pertes .....	28
i. Le modèle de pertes initiales et à taux constant .....	29
ii. Le modèle de Curve Number (CN) .....	30
iii. Le modèle CN en grille .....	31
iv. le modèle de Green and Ampt .....	31

v. le modèle continue SMA .....	31
vi. Quelques avantages et inconvénients des modèles .....	32
b. Modélisation du Ruissellement .....	33
i. Les modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire .....	33
ii. Modèles d'hydrogramme unitaires synthétiques .....	34
iii. Modèle de l'onde cinématique .....	35
c. La modélisation des écoulements souterrains (Base flow method) .....	37
i. Le modèle constant .....	37
ii. Le modèle à récession exponentielle .....	37
iii. Le modèle à réservoir linéaire .....	37
I.3 Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC-HMS .....	38
i. Modèle de Puls (modified puls) .....	38
ii. Modèle de Muskingum .....	39
iii. Le modèle du décalage (lag model) .....	39
iv. Le modèle de l'onde cinématique .....	39
v. Le modèle Muskingum-Cunge .....	40
II. Modèle météorologique .....	41
II.1. Modélisation des précipitations .....	42
a. Méthodes basées sur les coefficients de pondération .....	42
b. Inverse du carré de la distance .....	43
c. Evènements pluvieux hypothétiques .....	44
II.2 Modélisation de l'Évapotranspiration (ETP) .....	46
III. Spécification de contrôle .....	46
IV. Réalisation de la simulation et visualisation des résultats .....	47
V. Le calage du modèle .....	47
Conclusion .....	48

#### Chapitre IV : Schématisation du modèle de bassin avec HEC-GeoHMS

Introduction .....	49
I. Création du modèle du bassin .....	49
II. Procédure de schématisation du bassin .....	50
a. Pré-traitement du terrain .....	50
b. correction du MNT .....	50
c. Sens d'écoulements .....	51
d. Accumulation de l'écoulement .....	51
e. Définition des cours d'eau .....	52
f. Segmentation des cours d'eau .....	52
g. Délimitation de ligne de partage .....	52
h. Polygones des lignes de partage .....	53
i. Traitement des segments du cours d'eau .....	53
j. Agrégation des lignes de partage .....	54
III. Établissement des éléments hydrologique du bassin .....	54
a) Représentation de l'exutoire .....	55
b) Lancer un nouveau projet .....	55
c) Générer la vue de projet .....	55
d) Traitement des sous bassins .....	56
e) Centroïde du bassin .....	57

f) La longueur du plus long chemin d'écoulement .....	58
g) Centre du cours d'eau principal .....	58
h) Contrôle des données de HMS .....	58
i) Légende de HMS .....	59
j) Schématisation HMS .....	59
k) Caractéristique des cours d'eau .....	60
l) La table des coordonnées des rivières .....	62
Conclusion .....	62
<b>Chapitre V : Application du HEC-HMS sur le bassin versant de Sidi Bel Abbas</b>	
Introduction .....	63
I- Préparation des entrées du modèle HEC-HMS .....	63
a) Procédure d'importation .....	63
b) Fichier à importer .....	64
c) Importation du modèle de bassin dans HEC-HMS .....	64
II. Estimation des paramètres théoriques .....	65
a) les sous bassins .....	65
b) Modèle météorologique .....	66
c) Spécification des contrôles .....	66
d) Introduction des précipitations .....	67
III. Visualisation des résultats .....	69
a) Exécution des paramètres .....	69
b) Résultats de la simulation .....	69
c) Graphes obtenus .....	70
IV. Calage du modèle .....	73
Conclusion .....	74
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>75</b>

## Introduction générale

Le développement social et économique dans un bassin versant dépend étroitement des potentialités dudit bassin en ressource en eau à la fois en quantité et en qualité. Selon le type des besoins, la qualité exigée peut être très différente. La connaissance des ressources en eau en tout point d'un bassin est d'un intérêt capital au développement de ces ressources. Pour se faire, l'usage d'un modèle hydrologique spatialisé s'impose. Les recherches au fil des années ont émis dans le monde de mettre en place des modèles qui ne diffèrent que par leur degré de précision lié à l'adéquation dans la reproduction des processus physiques entrant en jeu dans la transformation pluie-debit et du transport d'eau dans les cours d'eau.

La problématique des crues est un phénomène persistant qui ne cesse de faire des ravages sur tout le globe, pour cela nous nous sommes intéressée à la région de Sidi Bel Abbes dans ce projet de fin d'études, qui est confrontée à plusieurs crues. Et pour pouvoir déterminer ses zones inondables, il faudrait une bonne étude hydrologique et un bon hydrogramme de crue.

La famille des logiciels HEC, disponible sur Internet, a été utilisée pour pouvoir déterminer cet hydrogramme de crue et évaluer les ressources en eau du bassin versant de Sidi Bel Abbes.

Notre étude est basée en premier lieu de présenter notre bassin versant d'étude tout en décrivant sa situation géographique, hydrologique, et géologique.

En deuxième chapitre, nous présenterons une synthèse bibliographique sur les modèles hydrologiques les plus utilisés dans la modélisation hydrologique ainsi certains logiciels les plus courants et disponibles dans le domaine public.

Dans le troisième chapitre, on se propose de décrire le modèle hydrologique HEC-HMS ainsi que toutes les méthodes de calcul des précipitations, du volume de ruissellement, du ruissellement direct et des écoulements souterrains.

En dernier, nous présenterons deux chapitres qui permettent de réaliser une schématisation de notre bassin versant afin d'appliquer les méthodes du modèle hydrologique et de visualiser les résultats obtenus.

## Chapitre I : Présentation du bassin versant de Sidi Bel Abbes

### Introduction

De sa situation géographique et des conditions géomorphologiques, le bassin versant de Sidi Bel Abbes est soumis à des inondations périodiques provoquées par les crues de l'oued qui est débouche.

Ces crues peuvent être dues soit aux déversements éventuels des barrages de Fergoug ou bien de Cheurfa, par suite des crues exceptionnelles du principal oued Mekerra, qui réagissent rapidement aux précipitations orageuses intenses et de courte durée.

D'après l'historique de l'oued de Mekerra, Sidi Bel Abbes a été confronté à des crues du :

- 4 février 1934 ;
- 17 janvier 1948 ;
- 15 avril 1954 ;
- 4 janvier 1964 ;
- 10 novembre 1984 ;
- et 2 octobre 2000 (qui a fait le décès de deux personnes).

La protection de ce bassin contre ces inondations et les nappes superficielles nécessitent un calibrage de réseau d'assainissement et drainage existant.

### I. Etude géographique du bassin versant de la Mekerra

Le bassin versant de Sidi Bel Abbés est situé dans les hautes plaines de l'Oranie par opposition aux basses plaines côtières, son altitude varie de 500 à 700 m du Nord au Sud, dont débouche l'Oued Mekerra. Le lit de cet oued est bien formé avec une largeur et une profondeur suffisante pour pouvoir écouler les crues.

La cuvette de sidi bel abbes que nous appellerons « *plaine de la Mekerra* » est comprise entre le Tessalah et la masse de l'Atlas tabulaire, entamée par l'oued Sarno et l'oued Mekerra d'une altitude moyenne de 500 m dans sa partie centrale est orientée et inclinée sensiblement (West Sud-est). Il n'y a aucune dépression lacustre.

Cette plaine a environ 60 Km de long et 30 Km de large. Le sillon de Sfifef doit lui être rattaché malgré quelques traits originaux. Au sud le plateau T'elagh-Séfioun du nom des oueds qui le parcourent; d'une altitude moyenne de 800 à 900m présente un aspect nettement différent, il n'est séparé de la plaine de la Mekerra que par une légère ride. La dépression de tenira présente des caractères voisins de ceux qui font l'originalité de la plaine de la Mekerra, au Nord-ouest de Sidi bel abbes se trouvent les monts du Tessalah d'une altitude moyenne de 1051 m et qui constituent une barrière naturelle. Le relief est donc peu accidenté et en grande partie constituée par des plaines [Demmak, (2000)].

C'est un bassin de taille importante qui s'étale sur une superficie d'environ 3000 Km<sup>2</sup>.

Le bassin versant s'inscrit à l'intérieur d'un rectangle de coordonnées :

Géographiques :	
Latitude Nord	: 35°41' et 33°54'
Longitude Ouest	: 0°27' et 10°



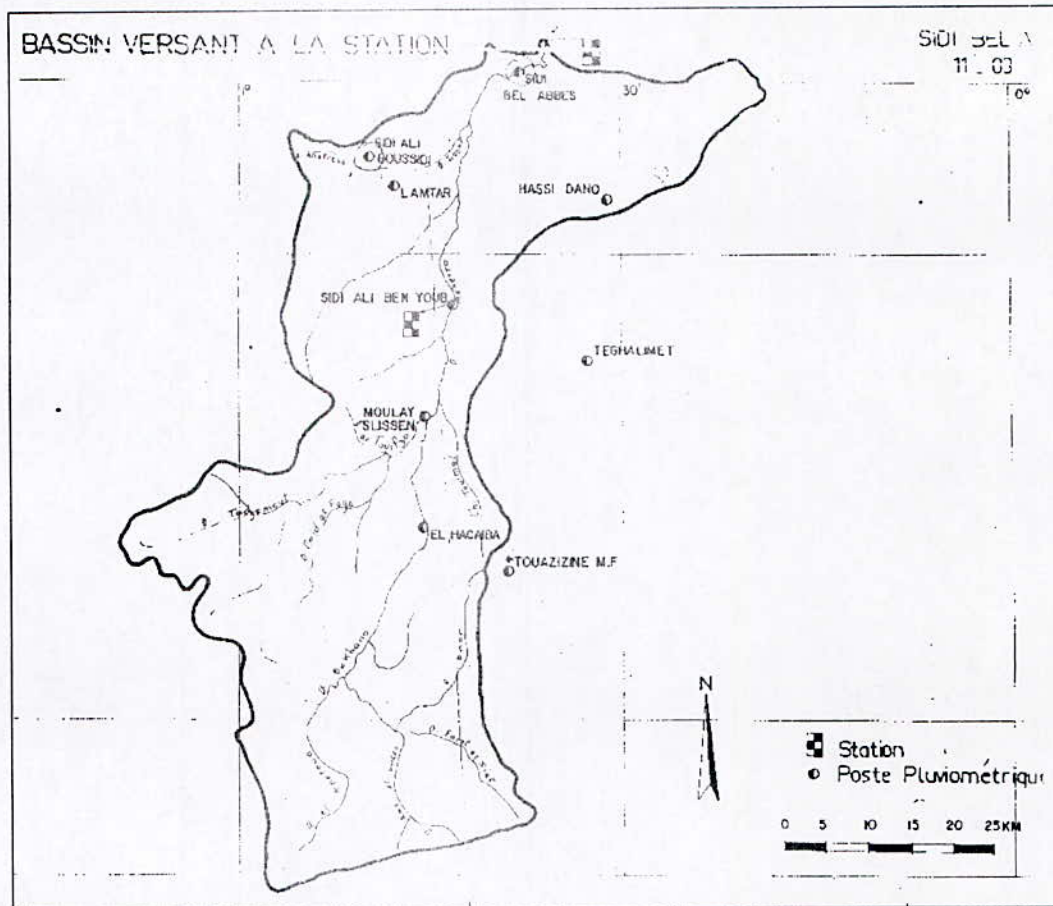


Figure I.1 : Représentation du bassin versant de Sidi Bel Abbès.

## II. Rappel de la situation hydro climatologique

### a. Situation climatologique

De tous les facteurs de production, le climat est dans la haute plaine de Sidi bel-abbès le plus important; l'aridité étant sa caractéristique principale, fonction du relief, sur lequel à son tour, il n'est pas sans influence, le climat conditionne l'hydrographie, la vie des sols, des plantes et des hommes, Situé entre le Sahel d'Oran et les hautes plaines steppiques le bassin versant de la Mekerra subit les influences maritimes et sahariennes. Les influences sahariennes prédominent car le bassin versant se trouve abrité de la mer par un écran montagneux. Nous distinguons une saison sèche et une saison humide, mais à la fin de celle-ci se trouve une période de transition de deux mois environ (mars à mai), dont les températures ne sont plus sauf exception celles de l'hiver et pas encore celles de l'été.

### b. Situation géographique des stations pluviométriques

La connaissance du climat reste encore insuffisante à cause du nombre limité de postes d'observations.

Quatre stations pluviométriques sont disponibles : la première est située à l'Ouest du bassin versant (Station de Sidi Ali Boussidi), la seconde est située à l'exutoire du bassin versant (Station Sidi Bel Abbès), la troisième est située à l'Est du bassin (Station de Mostapha Ben Brahim), et la dernière est située à l'aval de l'exutoire et au sud du bassin étudié (Station Sidi Lahsen).

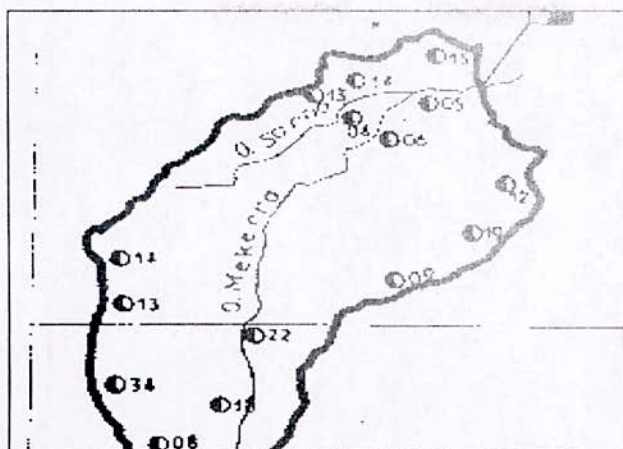


Figure I.2 : Stations pluviométriques

Nom de la station	Numéro d'inventaire des ressources en eau	Date de mise en service	Coordonnées	Observations
Station de Sidi Ali Boussidi	11.03.08	1942	X=178,25 m Y=206,15 m Z=610,00 m	Représente des lacunes de 1961 à 1968.
Station de Sidi Bel Abbas	11.03.05	1919	X=194,25 m Y=214,15 m Z=486,00 m	Représente des lacunes de 1929 à 1935 ainsi que de 1959 jusqu'à 1967.
Station de Mostafa Ben Brahim	11.03.12	1950	X=221,70 m Y=214,74 m Z=590,00 m	Représente des lacunes de 1962 à 1972.
Station de Sidi Lahsen	11.03.18	1972	X=191,20 m Y=212,90 m Z=470,00 m	Données disponibles.

Tableau I. 1 : Les différentes stations pluviométriques.

### c. Températures

Les températures traduisent la prépondérance des influences continentales sur les influences maritimes. Elles varient selon l'altitude la force et la direction du vent, l'amplitude de leur variation, tant annuelle que journalière, est caractéristique de la région connue pour ses hivers froids et ses étés brûlants, ses nuits fraîches en été et ses journées chaudes.

Les maxima annuels extrêmes se situent en juillet, la moyenne des maxima oscille entre 28° et 33° pendant les mois de juin à septembre pour tomber à 23° en octobre. Des températures dépassant 40° sont enregistrés chaque année pendant plusieurs jours et le thermomètre marque quelquefois 45° à 47° à l'ombre. En raison de la faible humidité de

l'air ces températures extrêmes sont beaucoup plus supportables dans la région de Sidi bel abbes que sur le littoral. Les minima extrêmes sont enregistrés en janvier-fevrier et atteignent parfois 60°. Au cours d'une même journée, les variations de températures atteignent 15° en hiver et 25° en été. La vie des plantes est souvent compromise par ces écarts des températures dont l'amplitude est encore plus grande au niveau du sol [Demmak, (2000)].

#### d. Les vents

Les vents du nord-ouest dominant en toutes saisons, ils sont observés chaque mois rendant 0 à 15 jours. Les vents du nord sont également bien répartis sur toute l'année à raison de 4 à 5 jours par mois. Dans l'ordre de fréquence décroissante les vents du Nord-west, de l'West, du Nord-est, de l'Est, du Sud-west et du Sud-est sont observés d'octobre à mars tandis que d'avril à septembre nous trouvons les vents du NW, du NE, du N, de l'W, de l'Est du Sud Est, du Sud West et du Sud. Les vents d'Ouest sont donc caractéristiques de l'hiver (7 à 10 jours par mois) et ceux du Nord-est de l'été (7 à 8 jours par mois).

#### e. Les précipitations

Les précipitations atmosphériques sont irrégulières et souvent insuffisantes. La haute plaine de Sidi bel abbes est placée dans des conditions particulièrement défavorables pour bénéficier d'une bonne pluviométrie.

Les orages d'été prennent parfois l'allure de véritables trombes d'eau qui ravinent les pentes et entraînent la perte des récoltes en cours de battage, inondant les terres riveraines et atteignent parfois les faubourgs même de la ville.

Les pluies torrentielles d'hiver atteignent parfois une rare violence (144m/m en une seule journée au Tessalah) ne sont pas moins dangereuses. A Sidi bel-abbes, il tombe en moyenne 400m/m par an, mais il y a des années où il n'y a que 200m/m [Lahlah, (1997)].

- *Répartition mensuelle des pluies*

Les pluies mensuelles sont caractérisées par un régime pluviométrique comparable à celui de l'année sur la période 1969-1999, traduisant ainsi une même irrégularité. La figure I.3 établie à partir des pluies mensuelles moyennes de la période 1969-1999, pour les stations présentant des distributions des précipitations moyennes mensuelles interannuelles.

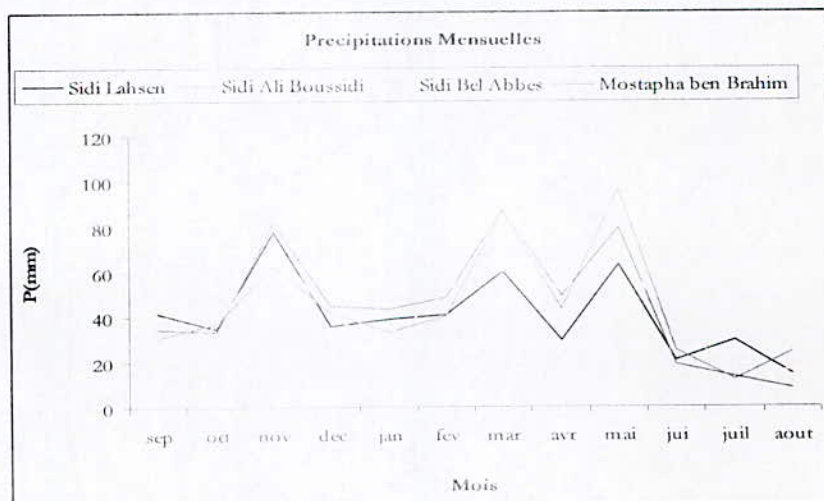


Figure I.3 : Répartition de la pluie mensuelle 1969/1999.

Cette figure met en évidence généralement trois périodes pluvieuses: une première, plus pluvieuse s'étale en Mai, une seconde moyennement pluvieuse entre Octobre et Novembre et une troisième en Mars.

- Répartition annuelle des pluies

Les précipitations annuelles calculées pour les stations durant une période de 30 ans sont données par la figure I.4 suivante :

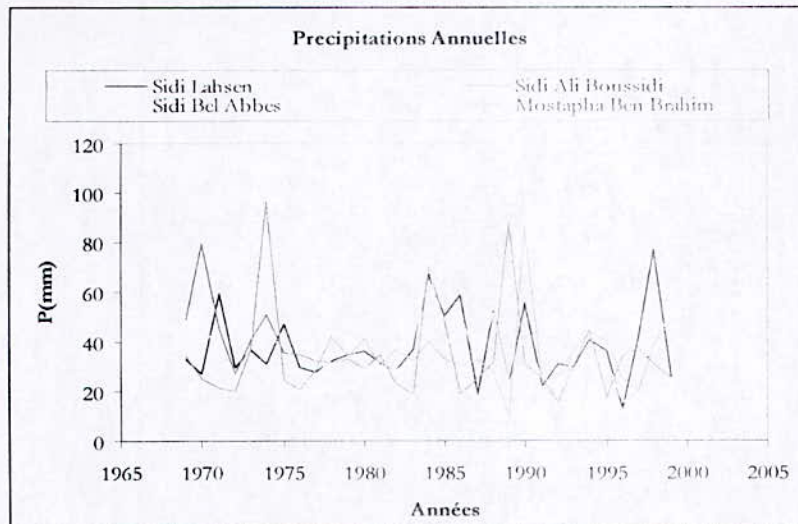


Figure I.4: Répartition de la pluie annuelle 1969/1999.

**f. Situations hydrométriques**

On dispose de deux stations hydrométriques, l'une se trouvant à l'amont de l'exutoire qui est celle de Sidi bel abbès et l'autre à l'aval de l'exutoire qui est celle de Sidi Ali Benyoub, on trouve des données disponible sur ces stations (1949-1995) avec quelques années de lacunes, dont la mesure de ces débits s'effectuent à Oran.

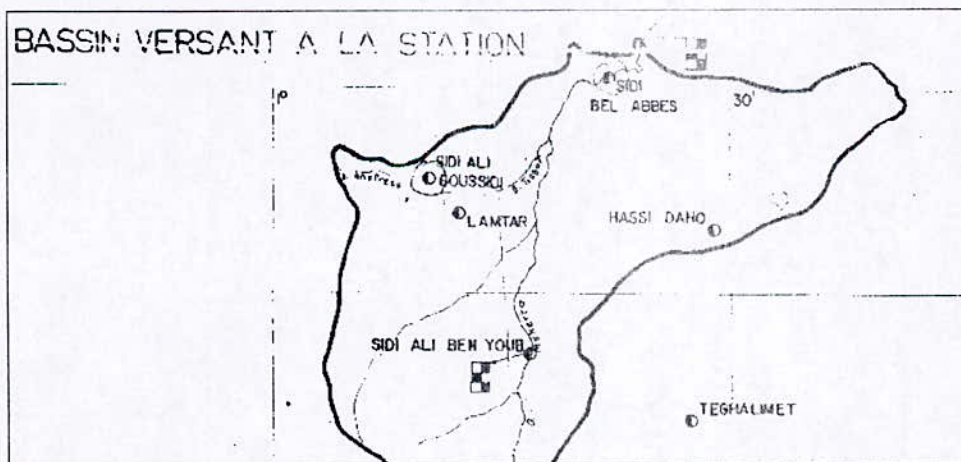


Figure I.5 : Stations hydrométriques.

**Station de Sidi Bel Abbès**

Cette station se trouve au coordonnées (x = 1 99.07 Km, y = 219.75 Km), sa mise en service est de 1942. Les moyennes mensuelles et annuelles de ces deux stations sont représentées dans cette figure I.6 :

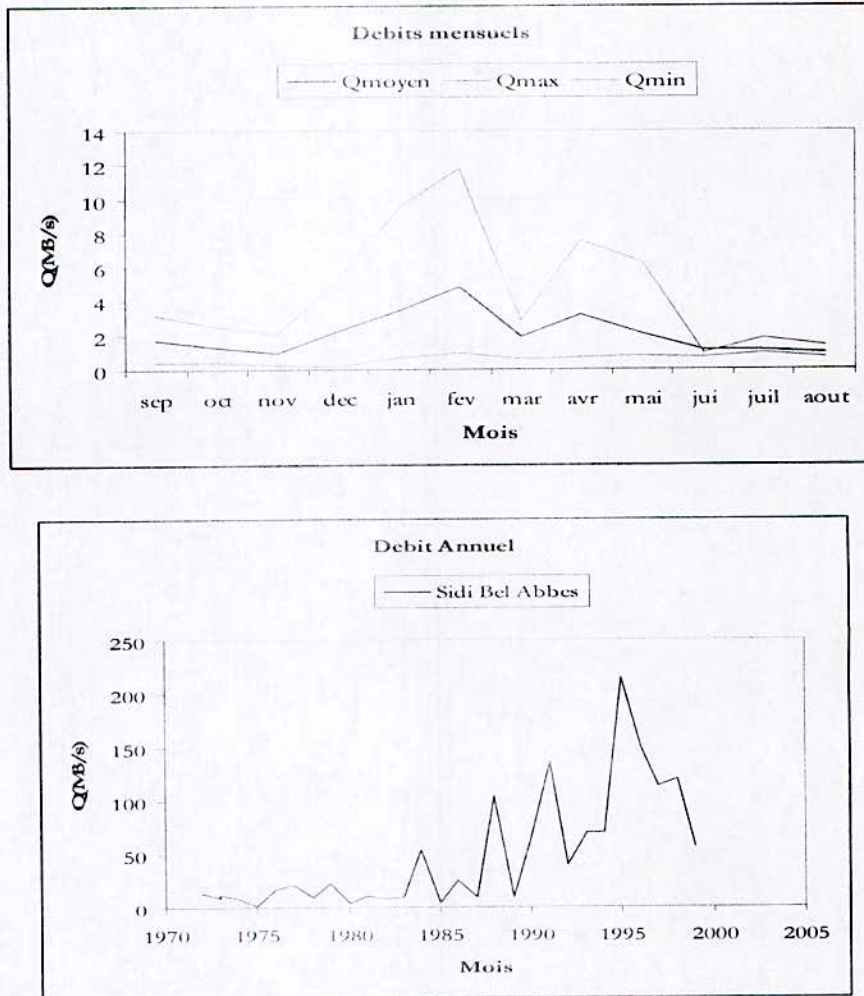
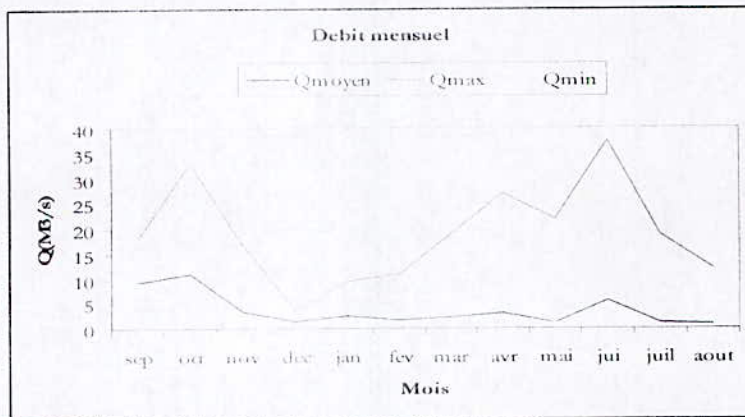


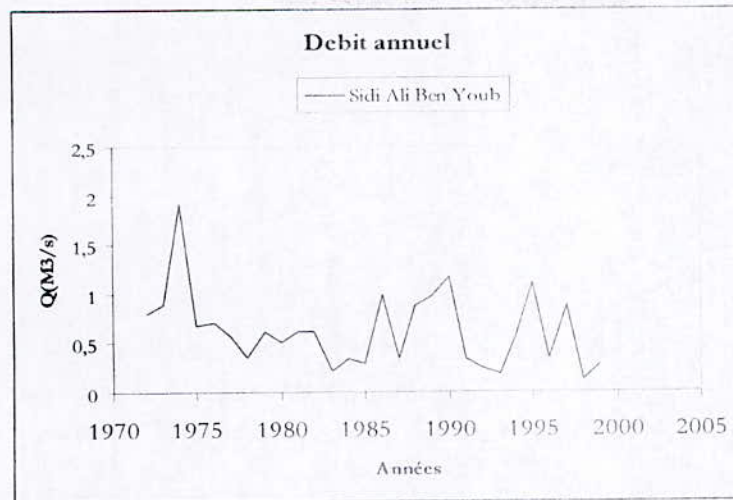
Figure I.6: Répartition des débits annuels et mensuels de la station Sidi Bel Abbas (1972-1999).

**Station de Sidi Ali Benyoub**

Cette station se trouve au nord-ouest du village elle est de coordonnées (x = 183.7 Km, y = 192.2 Km), sa mise en service date de 1949/1962. La cabine se trouve sur la rive droite de l'oued et à l'intérieur de celle-ci on trouve un téléphérique avec saumon utilisé pour les jaugeages de crues. On trouve aussi un limnigraphe enregistreur et à l'extérieur de la station des échelles limnométriques. Il existe un déversoir ou sont effectués les jaugeages d'étiage.

Les débits disponibles sont représentés sur la figure I.7 :





**Figure I.7 :** Répartition des débits annuels et mensuels de la station hydrométrique Sidi Ali Benyoub (1972-1999).

### III. Brouillard, humidité, évaporation

Les brouillards fréquents en hiver sont surtout nuisibles aux plantes. L'humidité atmosphérique est faible (77% en décembre et 60 % en été). Le déficit d'eau dans le sol se trouve aggravé par une évaporation plus active. L'intensité de cette évaporation a une influence directe sur l'évolutif du sol, elle entraîne le dépôt à faible profondeur des sels en solution dans l'eau et nous fait assister à la formation de cette croûte calcaire.

Il apparaît donc que les précipitations jouent un rôle prépondérant dans la vie agricole [Demmak, (2000)].

### IV. Autres caractéristiques

#### a. Géologie générale

Le bassin versant de Sidi Bel Abbes est une dépression sublittorale. Les terrains présentent des variations alluvionnaires et certains sols sont constitués par des alluvions argileuses salifères, les marais proprement dit présentent des alluvions limono argileux. Les formations géologiques datent du mésozoïque et sont responsables de la salinisation des plaines sublittorales de l'Oranie, une autre source de salinisation est l'évaporation de la lagune qui constitue la plaine. L'évaporation de ce volume d'eau a contribué à augmenter les quantités de sels dans les strates alluvionnaires. Dans la majeure partie de la basse plaine, les sols argileux présentent une grande accumulation de chlorure dans leurs horizons superficiels.

#### b. Sols

La haute plaine de Sidi bel-abbes est allongée d'Ouest en Est et comprend des plus anciens aux plus récents les terrains sédimentaires suivants :

- Formation du Trias: ils n'ont aucune influence sur la nature des matériaux quaternaire de la plaine et sont très rares ;
- Formation du pléocène inférieur : On les trouve à l'ouest et au nord de la plaine de Sidi bel-abbes. Il constitue le substratum des dépôts plus récents. Il est formé de marnes verdâtres dans lesquelles s'intercalent de petits bancs de calcaire marneux blancs et plus rarement de minces lits, gréseux. Dans le secteur étudié la présence de calcaire marneux a

été observée fréquemment,

- Calcaire de l'Eocène supérieur : Les affleurements sont assez peu développés dans le secteur étudié. Il a été observé en pointement rocheux constitué de calcaires durs massif très riches en fossiles ;
- L'oligocène : Localisé sur les cotéaux et collines du nord, de la plaine et principale en bordure, il comprend des grés en bancs plus ou moins épais assez argileux et friable alternant avec les lits marneux parcouru de filonets de calcite ;
- Pliocène ancien : Constitué de grés durs et compact alternant avec des bancs plus tendres assez argileux de teinte rougeâtre il occupe la bordure sud de la plaine ;
- Pliocène récent: Le niveau supérieur étroitement imbriqué aux formations quaternaires anciennes comprend les formations continentales constitués à la partie supérieure de bancs assez puissants de conglomérats et de couches de grés grossier intercalés dans un dépôt de limon grisâtre, au niveau de la plaine ce dépôt est formé de couches sableuses à stratification entrecroisée ;
- Il existe des alluvions du quaternaire récentes dont l'étude détaillée exige beaucoup plus de temps ;

Le cours de la Mekerra conserve une direction constante pendant sa traversée de la plaine, L'écoulement se fait nord 95 à 20 degré jusqu'à Sidi bel-abbes ou un petit relief du miocène venant des nappes géologique du Tessalah oblige la Mekerra à prendre une direction ouest nord est, après la traversée de la ville l'oued réussit à franchir la barrière tertiaire et s'engager vers le nord.

Au fond du lit à 10 m de profondeur on trouve des limons fins argileux récents, de 10 à 30 m on trouve des alluvions grossiers et de 40 à 70 m on trouve des terrains détritiques conglomératiques. Les alluvions grossières sont connues pour claquer nuit le long de la Mekerra [Lahlah, (1997)].

### c. Végétation

C'est une région agricole particulièrement fertile, elle est exploitée depuis 1842 particulièrement axée sur la production céréalière, elle est aussi une région de vignoble qui couvre d'importante superficie dans le territoire.

Des cultures irriguées, principalement le maraîchage, sont pratiquées surtout en bordure de l'oued Mekerra également par pompage dans les nombreux puits creusés.

### d. Hydrographie

La plaine de sidi bel-abbes a l'hydrographie de son climat et de sa structure. D'une part les précipitations sont violentes, irrégulières et au total peu importantes. Ancienne dépression lacustre formée d'une succession de cuvettes remblayées d'alluvions quaternaires. La plaine de Sidi bel-abbes dont l'écoulement vers la mer est récent, est encore imparfaitement drainée faute de cours d'eaux permanents importants, il est du moins permis de compter sur l'existence de nappes souterraines et de courants.

Seul cours d'eau important, la Mekerra prend la source du bassin, quelques oueds lui apportent les eaux recueillies dans la partie sud-est des monts de Tlemcen, des apports lui parviennent au moment des fortes pluies et déterminent des crues souvent violentes.

Le lit de la Mekerra est profondément encaissé mais, il se trouve sensiblement au niveau de la plaine et au moment des crues celle-ci est envahie et dévastée. La Mekerra dans cette

rançon reçoit des apports d'eau importants dus à de Petits affluents et résurgences.

En aval de Sidi bel-abbes le lit de la Mekerra s'enfoncé encore, la vallée encaissée de 20 à 30m au pied du village, prend de la largeur et les cultures maraichères peuvent s'y développer. Le cours de la rivière s'infléchit vers l'est à la hauteur du village.

Le débit de la Mekerra est très variable et une faible partie seulement des eaux recueillies est utilisable pour l'irrigation en amont et aval de Sidi bel-abbes, de plus important des affluents de la Mekerra est l'oued Sarno dont le débit au moment des grandes pluies d'hiver ou des orages a pu pendant quelques heures [Demmak, (2000)].

### Conclusion

La présentation de notre bassin versant d'étude nous permettra d'évaluer certains paramètres à utiliser dans notre application.

Vu la situation géographique et les répartitions des pluies et des débits, nous savons que cette région est exposée aux inondations, dont le but de ce travail est de faire une étude hydrologique de la simulation de pluie débit d'une journée ou il y a eu une forte crue.

La modélisation pluie débit utilise certains logiciels disponibles au niveau du domaine public que nous verrons dans le chapitre qui suit.



Chapitre II : **Modèles hydrologiques**

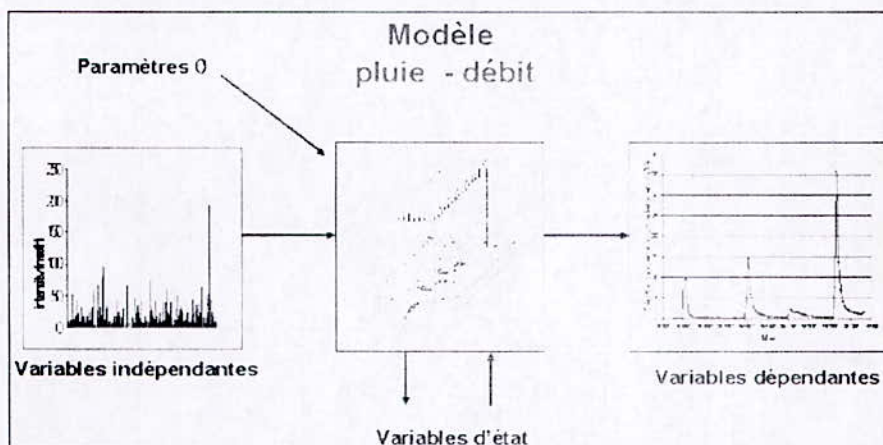
*« Sous de nombreux aspects, la modélisation hydrologique est plus un art qu'une science et elle a toutes les chances de le rester ».*

*League and Freeze (1985).*

**Introduction**

La modélisation est une discipline des sciences hydrologiques qui s'intéresse principalement au cycle hydrologique afin d'aboutir à un outil de travail exploitable dans différents domaines.

La modélisation hydrologique comme la modélisation mathématique d'une manière générale a son vocabulaire propre qui est présenté comme suit :



**Figure II.1 :** Représentation d'un modèle hydrologique [Gaume, (2000)].

**I. Les variables et paramètres d'un modèle hydrologique**

On peut définir les paramètres caractérisant un modèle hydrologique comme suit :

- **Variables indépendantes ou variables d'entrée**

Dans le cas des modèles hydrologiques, il s'agit essentiellement des mesures pluie. Les modèles hydrologiques sont des modèles dynamiques, les données d'entrée en fonction du temps. Certains modèles utilisent des données d'entrée spatialement distribuées.

- **Variables dépendantes ou variables de sortie**

Il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire du bassin versant.

- **Variables d'état**

Variables permettant de caractériser l'état du système modélisé, qui peuvent évoluer en fonction du temps dans un modèle dynamique. Il s'agit, par exemple, du niveau de remplissage des différents réservoirs d'eau du bassin versant, du taux de saturation des sols, mais aussi de la profondeur des sols, des pentes ... Certaines variables d'état sont mesurables.

### ▪ Paramètres

La notion de paramètre est intimement liée à celle de modèles conceptuels ou empiriques. Dans de nombreux cas, il n'est pas possible de représenter dans un modèle le processus physique parce que l'échelle de ce processus est trop petite et que les variables d'état contrôlant le processus ne sont pas accessibles à la mesure. Un modèle plus global est alors utilisé pour décrire le processus, mais certaines de ses variables d'état n'ont plus de sens physique, et ne peuvent plus être reliées à des variables mesurables. Ces variables, dont la valeur doit être déterminée par calage, sont appelées paramètres.

### ▪ Erreur de modélisation

C'est une mesure de l'écart entre les valeurs simulées à l'aide du modèle et les valeurs mesurées. Le critère le plus souvent employé en hydrologie pour quantifier l'erreur est l'écart quadratique.

### ▪ Calage

Au sens strict du terme, c'est l'opération qui consiste à trouver les valeurs des paramètres du modèle qui minimisent l'erreur de modélisation [Gaume, (2000)].

## II. Pourquoi des modèles hydrologiques?

Les modèles hydrologiques, sont nés bien avant l'avènement de l'informatique. A quel besoin répondaient et répondent encore ces modèles? La littérature scientifique présente une très grande diversité de modèles dont très peu ont trouvé une utilisation opérationnelle. La question de l'utilisation de modèles en hydrologie - pour effectuer des prévisions, dimensionner des ouvrages d'art, délimiter des zones inondables - se pose en particulier pour les bassins versants pour lesquels on dispose de séries de débits mesurés. Ceci dit, on peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie [Ider, (2004)].

### ➤ La modélisation comme outil de recherche

La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures. Les hydrogrammes de crues simulés avec différentes hypothèses sur le coefficient d'apport sont confrontés à un hydrogramme mesuré.

### ➤ La modélisation comme outil de prévision

C'est l'anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.

### ➤ La modélisation comme outil d'extrapolation

C'est la reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un Plan de prévention des risques, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiages, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des

débites sur le site étudié. L'utilisation de longues séries de pluies - éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie - couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares [Henine, (2005)].

### III. Différentes approches de modélisation

Le terme de modèle recouvre une large variété d'outils, à la philosophie et aux objectifs différents.

Nous présenterons ici quelques modèles connus (figure II.2):

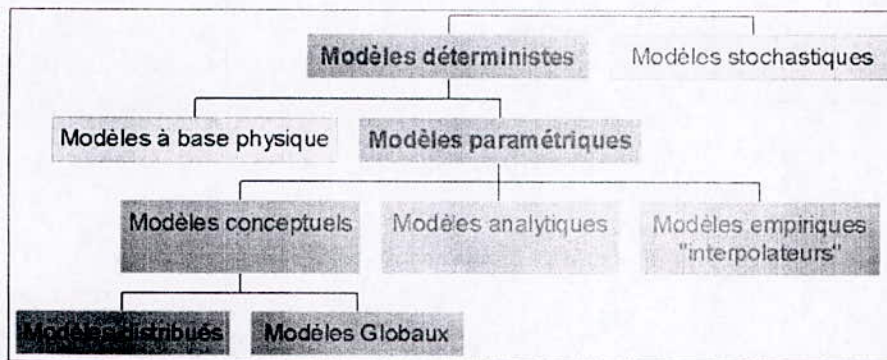


Figure II.2 : Les différentes approches de modélisation

#### 1. Modèles déterministes

Modèle qui associe à chaque jeu de variables d'entrée, de variables d'état et de paramètres une valeur réalisation unique des variables de sortie.

##### a. *Modèle à base physique*

c'est un modèle basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie comme nous l'avons vu plus haut. Certains modèles comme le SHE (Refsgaard & Storm, 1995) tendent à s'en rapprocher. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles. La précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante. Dans la pratique, les profondeurs et les conductivités moyennes des sols représentatives de sous parties du bassin versant doivent être évaluées par calage et deviennent, de fait, des paramètres.

b. *Modèle paramétrique* : modèle incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

##### ▪ *Modèle conceptuel*

Ce type de modèle repose sur l'analogie remarquée entre le fonctionnement d'un bassin versant et un ensemble de réservoirs interconnectés. Nous notons d'ailleurs qu'il serait plus judicieux de regrouper ces modèles sous la dénomination « Modèle conceptuel à réservoir ». Plus précisément, quand la structure du système et des lois le régissant sont inconnues ou lorsque la pauvreté des informations et la complexité des phénomènes en jeu prévalent, le comportement du système en question est simplifié. Ainsi, les modèles conceptuels intègrent des facteurs complexes en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple. Au travers de ce type de modélisation, sont construites

des structures empiriques censées reproduire les sorties du système étudié (débit, concentration,...) à partir des variables d'entrée (pluie, évapotranspiration, fertilisation, pratiques agricoles...). Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement. Le modèle CEQUEAU est un parfait exemple de modèle conceptuel que nous présenterons dans le paragraphe suivant.

#### ▪ *Modèles analytiques*

Modèle pour lequel les relations entre les variables de sorties et les variables d'entrées ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : les paramètres du modèle sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables.

#### ▪ *Modèles empiriques*

Le type de fonctions reliant les variables est fixé à priori (fonctions polynomiales, fonctions sigmoïdes). Le niveau de complexité (nombre de fonctions à utiliser, ordre du polynôme) étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées.

Le processus sous-jacent - écoulements d'eau dans un réseau complexe de pores - ne peut être décrit. La conductivité hydraulique d'un sol n'est pas accessible directement la mesure doit être évaluée à partir de tests d'infiltration.

#### ▪ *Modèles globaux*

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue. Un exemple de ce type de modèle est le modèle IHRACRES [Vauchui, (1999)].

## 2. Modèles stochastiques

L'une au moins des variables d'état ou des paramètres est une variable aléatoire. Par voies de conséquence, la ou les variables de sortie sont des variables aléatoires. La reconstitution de la distribution des variables de sortie nécessite des simulations répétées en tirant aléatoirement la valeur de la variable d'entrée.

## 3. Modèles Spatialisés

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant à des différentes écoles hydrologiques sont en phase avancée de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties où les caractéristiques des bassins versants sont distribuées dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologiques (aires contributives).

Nous pouvons classer les modèles spatialisés en trois grands types :

- Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés ;
- Modèles physiques spatialisés ;

- Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés.

a. ***Modèles conceptuels spatialisés ou semi spatialisés***

Les modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés représentent un grand progrès sur les modèles globaux quand il s'agit d'analyser le fonctionnement interne d'un bassin. Le bassin versant est discrétisé en unités spatiales (mailles ou sous-bassins) considérées comme homogènes, qui se vident les unes dans les autres de l'amont en aval. Ainsi, on a la possibilité de tenir compte de la répartition spatiale des facteurs et de suivre la genèse et la propagation des débits à l'intérieur du bassin. C'est le cas du modèle CEQUEAU et du modèle HEC-HMS.

b. ***Modèles physiques spatialisés***

Les modèles à base physique spatialisés sont des modèles qui décrivent les mécanismes internes d'un système (bassin versant) ayant comme base les lois de la mécanique, de la physique, de la thermodynamique, etc. Du point de vue théorique, ces modèles sont indépendants de tout calage parce que leurs paramètres sont mesurables. Ils permettent une description théorique unifiée de la plupart des flux observés dans un bassin versant et servent à modéliser les principaux processus hydrologiques comme :

- L'écoulement de surface à partir des équations de Saint-Venant ;
- L'écoulement en milieu saturé à partir des équations de Darcy ;
- L'écoulement en milieu non saturé à partir des équations de Richards ;
- L'évapotranspiration à partir des équations de conservation ou de relations entre flux.

A partir d'un découpage de l'espace en mailles de taille adaptée au problème à traiter, ils simulent les diverses composantes du cycle de l'eau sur chaque maille (ruissellement, infiltration, évapotranspiration) et convolent les transferts de maille à maille, jusqu'au réseau hydrographique constitué. Ces modèles sont complexes à mettre en œuvre et exigent d'importantes quantités de données. Ils sont bien adaptés à la simulation de la diversité d'un bassin.

Cependant, ces modèles ne peuvent traiter les grands bassins en raison de leur grande hétérogénéité morphologique et météorologique. Parmi ces modèles on peut citer le modèle SHE.

c. ***Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés***

Pour dépasser les limites de chacune des approches précédentes (modèles conceptuels trop peu réalistes, modèles à base physique trop complexes), il est intéressant d'essayer une modélisation hydrologique qui peut être :

- A base physique, fondée sur les processus réels mais simplifiés ;
- Semi-spatialisée, fondée sur une discrétisation en unités relativement homogènes, qui permettent de tenir compte de la variabilité spatiale de la structure du bassin versant.

La méthode de discrétisation spatiale varie d'un modèle à l'autre : mailles carrées, sous-bassins versants, éléments de versant, plans versant et canal, unités hydrologiques ou aires contributives (modèle TOPMODEL) [Gaume, (2000)].

#### **IV. Présentation de quelques modèles**

Dans cette section on présente une petite description des différents modèles disponibles dans le domaine public à analyser. L'objectif de cette analyse est de ressortir vers la fin avec un modèle hydrologique qui satisfait l'ensemble des critères de sélection. L'ensemble des ces modèles ne satisfait pas tous les critères imposés, mais ils sont attractifs, car ils peuvent résoudre, même partiellement, les différentes tâches du projet.

##### **1. Critères de sélection**

Les critères de sélection d'un modèle hydrologique dépendent : Du type de l'approche qu'il utilise, de la qualité des résultats qu'il fournit, de son utilisation, comme par exemple les performances des interfaces graphiques utilisées (sa convivialité), de la portabilité du logiciel, la gestion et la structure des entrées/sorties, ainsi que de la facilité d'intégration et d'interconnexion avec d'autres outils de traitements et d'exploitation des résultats (pré et post-traitement).

Les principaux critères doivent répondre aux exigences suivantes :

- Le type d'approche utilisée : Le modèle choisi doit tenir compte des conditions climatologiques et topographiques des bassins versant étudié ;
- L'importance des sorties du modèle : Il doit prédire les variables requises par les modèles hydrodynamiques tels que les hydrogrammes de crues de longues et de courtes durées au niveau du bassin versant ;
- Les différents processus hydrologiques modélisés doivent estimer adéquatement les différentes variables (est ce que le modèle est capable de modéliser les précipitations en fonction du temps, les précipitations accumulées, événements instantanés ou continus, ... ?) ;
- Disponibilité des entrées du modèle (est ce que toutes les entrées requises par le modèle peuvent être fournies raisonnablement sans surcoût important en temps) ;
- La disponibilité du modèle dans le domaine public. Si non, on doit rajouter le critère du prix du modèle. Les prix des modèles hydrologiques varient très considérablement [Ider, (2004)].

##### **2. Modèle global (IHACRES)**

Le modèle IHACRES (Identification of unit Hydrographs and Component flow from Rainfalls, Evaporation and streamflow data) est le résultat d'une collaboration entre le CEH (Centre for Ecology and Hydrology) du Royaume-Uni et l'Université Nationale de l'Australie (ANU). Ce logiciel peut être appliqué pour des investigations dans des petits bassins versants équipés pour des études spéciales ou pour des études régionales dans des grands bassins.

Le modèle IHACRES utilise la fonction de transfert à partir de trois modules de calcul, en séries, il permet la simulation des écoulements continus ou instantanés pour n'importe quel bassin versant et n'importe quelle donnée temporelle supérieure ou égale à 1 min. Des études publiées ont démontré qu'on peut aller d'un intervalle de 6 min pour des bassins versants de 1ha (0.01km<sup>2</sup>) aux données mensuelles pour les des bassins versants de 10000 Km<sup>2</sup>.

Dans son mode de séparation des hydrogrammes, le logiciel IHACRES comporte trois modèles de stockages conceptuels : Le modèle non linéaire qui détermine les précipitations effectives et deux modèles de stockage en parallèle (stockage de surface et souterrain) qui assure le transfert des précipitations effectives au cours d'eau (voire la figure ci-dessous).

Ce modèle demande peu de données : les précipitations, un hyétogramme (pour le calage), la température ou l'ETP, et les dimensions du bassin versant. En sortie du modèle on récupère : un hydrogramme de crue modélisé, l'humidité du bassin et les incertitudes indicatives associées aux paramètres d'hydrogramme unitaire [Gomez, (2002)].

### **3. Modèles semi-spécialisés (HEC, CEQUEAU & MIKE BASSIN)**

Il existe plusieurs modèles semi-distribués (ou semi-spatialisés), l'ensemble des modèles sélectionnés peut être utilisé avec succès dans le cadre du projet, l'avantage que présentent les modèles semi-distribués est qu'ils disposent d'une structure à base physique et ils demandent moins de données que les modèles distribués. Le modèle HEC-HMS est un exemple de ce type de modèles connu par ses performances de calcul et par la qualité de ses résultats ; il est disponible gratuitement dans le domaine public [Refsgaard, (1995)].

#### ***a. Le Modèle HEC-HMS***

Le HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) est un logiciel qui simule le comportement hydrologique d'un Bassin Versant suite à des événements pluvieux prédéterminés, développé par Hydrologic Engineering Center (HEC) du corps de l'armée américaine des ingénieurs. Ce logiciel permet de calculer des hydrogrammes de crues pour plusieurs objectifs à savoir les études de drainage urbain, la prévision des crues et leur impact, la conception des réservoirs, la réduction des effets des inondations. Le programme présente une interface graphique, des composantes hydrologiques intégrées, un système spécifique de stockage de données (DSS) et des outils de gestion, etc.

Le logiciel HEC-HMS permet de traiter ou de simuler à la fois les différentes données suivantes :

- Les précipitations : Ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométriques réels d'événements pluvieux ordinaires ou exceptionnels mais aussi à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique ;
- les pertes (par infiltration, retenue ou évapotranspiration) qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant ;
- Les ruissellements directs qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charge ;
- L'hydrologie fluviale, concernée par l'écoulement de l'eau dans le lit de la rivière.

Ces différents paramètres seront ensuite modélisés mathématiquement par un ensemble de modèles intégrés dans HEC-HMS et qui permettront d'obtenir la

réponse du système hydrologique global suite à un changement de conditions hydrométéorologiques [Lemieux, (2001)].

### ***b. Le modèle CEQUEAU***

Le modèle hydrologique CEQUEAU, développé à l'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau (INRS-Eau) depuis 1971, est un modèle déterministe distribué à bilan, qui prend en compte les caractéristiques physiques du bassin versant par le découpage de celui-ci en éléments de même dimension. Cette discrétisation spatiale du bassin versant permet de suivre l'évolution spatio-temporelle des phénomènes, de prévoir l'effet de toute modification physique du bassin versant et de prendre en compte des réservoirs réels ou fictifs.

Le découpage dans l'espace d'un bassin versant peut être très varié dans sa forme et sa densité. Pour le modèle CEQUEAU, le bassin versant est découpé en surfaces carrées de dimensions semblables appelées « carreaux entiers » c'est le premier découpage. Un deuxième est ensuite nécessaire pour reproduire le cheminement de l'eau entre les carreaux entiers et vers la rivière. Ceci se fait en subdivisant chaque carreau entier en « carreaux partiels » à l'aide des lignes de partage des eaux ::

- *Le premier découpage* délimite le bassin versant en surfaces élémentaires que nous appellerons "carreaux entiers". La dimension à donner aux "carreaux entiers" dépend principalement de la superficie du bassin versant étudié, des données météorologiques disponibles, de la topographie du terrain, etc. Les données physiographiques nécessaires pour chaque "carreau entier" sont l'altitude, les pourcentages de forêts, de lacs et de marais. Ces données sont déterminées à partir des cartes topographiques du bassin versant étudié ou à l'aide d'un système d'information géographique.

- *Le deuxième découpage* consiste à subdiviser les carreaux entiers en carreaux partiels. Ces éléments sont le résultat de la subdivision des "carreaux entiers" en fonction des lignes de partage des eaux. On compte jusqu'à quatre "carreaux partiels" par "carreau entier". Les données nécessaires pour ces éléments partiels sont : Le sens d'écoulement de l'eau et son pourcentage de superficie par rapport au "carreau entier" qu'il subdivise.

Le modèle compte deux parties principales visant à décrire le mieux possible l'écoulement de l'eau vers l'exutoire du bassin versant. La première partie concerne l'écoulement vertical de l'eau appelée **fonction de production** qui transforme les précipitations réelles en précipitations utiles sur chaque carreau entier et à chaque pas du temps. La schématisation de ce processus est représentée par un ensemble de réservoirs communiquant entre eux à l'aide de relations mathématiques reproduisant, à l'échelle du pas de temps de la simulation, les différents transferts de masse (figure II.3). Et la deuxième partie concerne le transfert de l'écoulement dans le réseau de drainage appelé **fonction de transfert** qui assure le cheminement de l'eau entre les carreaux partiels (figure II.4).



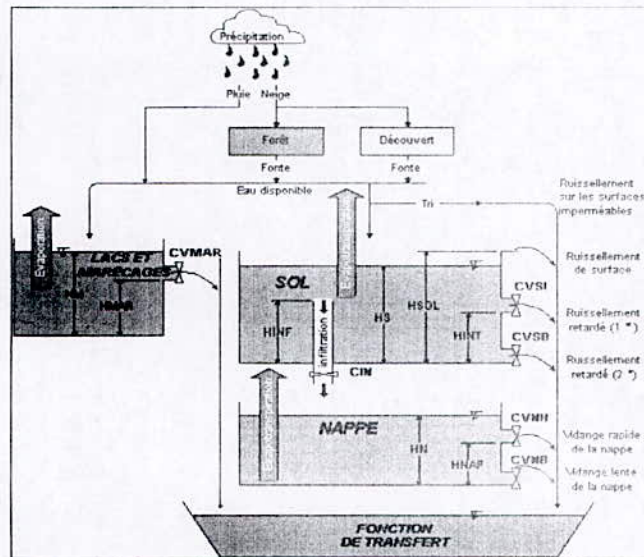


Figure II.3 : La fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU.

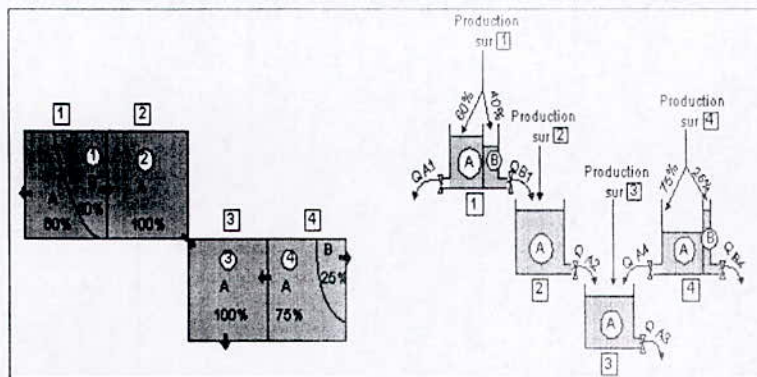


Figure II.4 : La fonction de transfert du modèle CEQUEAU.

Le modèle CEQUEAU dispose d'une interface graphique conviviale. Les informations nécessaires à la simulation (données physiographiques et hydrométéorologiques ainsi que tous les paramètres reliés à la simulation) y sont structurées sous la forme de projets pouvant être sauvegardés sur le disque. Chaque projet réfère à un ou plusieurs bassins versants et peut comprendre plusieurs essais de simulation. Ce concept permet une gestion aisée des données d'entrée du modèle ainsi que des résultats de simulation que l'utilisateur désire conserver.

Les dernières modifications apportées pour la version 4.0 ont permis de faciliter et d'améliorer grandement l'utilisation de ce logiciel, cette version permet de :

- Choisir la langue d'affichage ;
- De simuler pour des pas du temps de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12 heures ou journaliers ;
- Prévoir des débits en temps réel avec mise à jours ;
- Traiter plusieurs bassins versants simultanément ;

- Offrir un nombre accru de types de graphiques permettant une analyse et une visualisation plus éclaircies des résultats et par conséquent une meilleure prise de décisions ;
- Introduire la variation spatiale des principaux paramètres de la fonction de production [Gomez, (2002)].

### *Les données météorologiques*

En plus des données physiographiques des carreaux entiers, le modèle requiert sur chacun de ces carreaux, à chaque pas de temps, les données suivantes : les précipitations liquide et/ou solide ainsi que les températures maximales et minimales de l'air.

Ces données n'étant disponibles qu'à un nombre limité de stations, le modèle permet l'utilisation de différentes méthodes d'interpolation de données et combler ainsi les lacunes. Les méthodes d'interpolation utilisées avec le logiciel CEQUEAU sont : la régression, la pondération et la méthode des polygones de Thiessen.

En général, les données dont nous aurons besoin sont :

#### Pour la simulation :

- Les températures maximales et minimales de l'air ;
- Les précipitations liquides ou solides ;
- Débits observés pour les besoins de calibrage du modèle.

#### Pour la prévision à court terme

- Les prévisions de la température de l'air aux stations météorologiques ou en des points de grille ou moyennes sur le bassin versant ;
- Les prévisions des précipitations aux stations météorologiques ou en des points de grille ou moyennes sur le bassin versant.

#### Pour la prévision à moyen terme

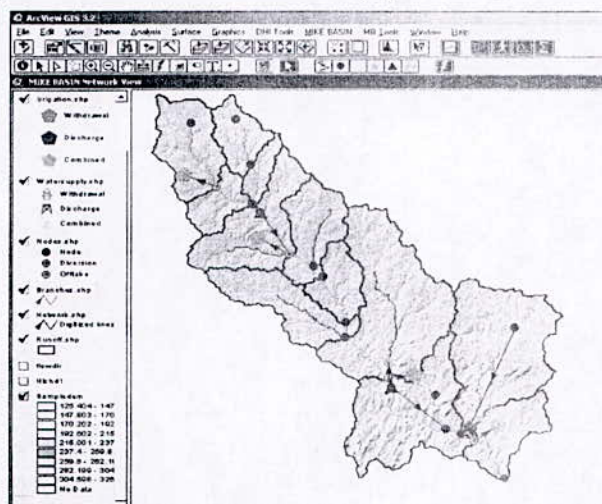
- Données météorologiques (température de l'air et précipitation) historiques moyennes du bassin versant.

### ***c. Le modèle MIKE BASSIN***

Le modèle MIKE BASSIN a été élaboré au Danich Hydraulic Institute. C'est un instrument de gestion des ressources en eau fondé sur une forte représentation par bassin versant des points d'eau et des utilisateurs d'eau potentiels.

Ce logiciel permet d'optimiser la gestion de l'utilisation des ressources en eau disponibles en relation avec les contraintes environnementales liées au sol, à la terre, à l'agriculture, à l'ingénierie et à la société. MIKE BASSIN permet d'effectuer une modélisation simple et intuitive des processus hydrologiques et hydrauliques à l'échelle du bassin versant. La modélisation hydrologique est basée sur une transformation pluie-débit. La modélisation hydraulique prend en compte le réseau fluvial (rivière, barrage, réservoirs) ainsi que la ressource souterraine (nappes). L'outil permet de décrire les demandes multisectorielles (domestique, industrielle, agriculture, production d'électricité, navigation, environnementale...) ainsi que les règles de priorité entre chacune de ces différentes utilisations.

MIKE BASSIN fonctionne sur la base d'un réseau fluvial digitalisé généré directement sur l'écran dans le logiciel Arcview (système d'information géographique). Toutes les informations relatives à la configuration du réseau fluvial, des barrages, de la position des utilisateurs d'eau, des prises d'eau ainsi que les prises de retour sont également données à l'écran (figure II.5).



**Figure II.5 :** Interface du modèle MIKE BASSIN sous le SIG Arcview

### *Les données de base*

Les données de base du modèle consistent en des séries chronologiques du ruissellement en chaque branche (rivière) générée par le sous bassin drainant. Les autres données relatives aux caractéristiques de barrage et aux règles de fonctionnement de chaque réservoir, aux séries chronologiques des données météorologiques et aux données pertinentes à chaque schéma d'approvisionnement en eau ou de périmètre d'irrigation telles que les exigences de dérivation et autres informations sur les débits de retour sont fournies par des fichiers complémentaires. Sachant que le modèle MIKE BASIN est une extension de Arcview, les informations géographiques du bassin peuvent être incluses dans la simulation des ressources en eau, la structure du modèle du bassin est éditée par Arcview.

### **4. Modèle physique spatialisé (MIKE SHE) :**

Ce modèle d'inspiration mécaniste, a été élaboré au Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE SHE est un système de modélisation des principaux processus de la phase terrestre du cycle hydrologique. Il permet d'intégrer les interactions entre les systèmes superficiels et souterrains, il simule le mouvement de l'eau et le transfert de polluants dans les bassins hydrographiques.

Il a pour objectif la modélisation de la partie continentale du cycle de l'eau et peut être en théorie, appliqué à des surfaces allant de la parcelle à la totalité du bassin versant. Parmi les domaines d'application de MIKE SHE, nous retrouvons l'étude classique de la dynamique du bassin versant, ainsi que le suivi des impacts relatifs aux modifications du bassin (occupation des sols, aménagement, types des sols...), ou de scénarios climatiques (sécheresse, fortes pluies...).

Le caractère mécaniste de ce modèle provient de l'utilisation de différents modèles mathématiques pour décrire chacune des composantes du cycle hydrologique et du

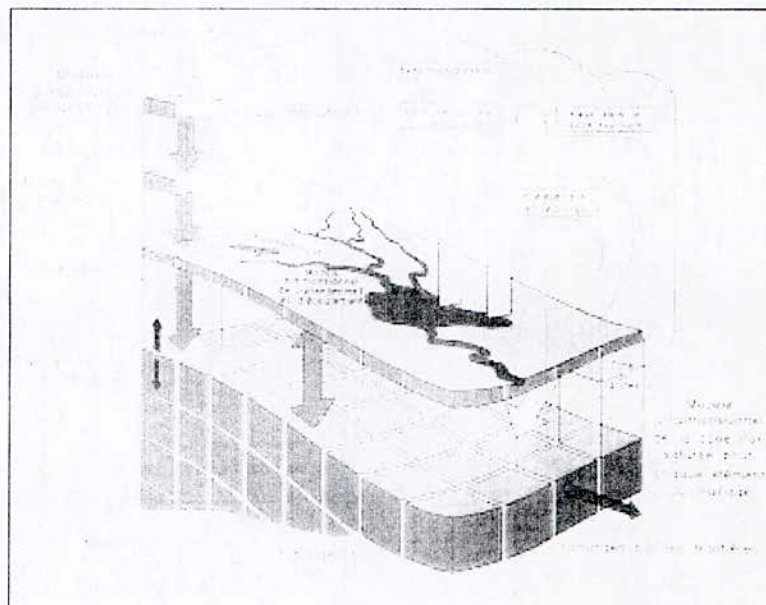
cycle des polluants. De ce fait, la discrétisation du bassin versant s'effectue classiquement par un découpage en strates horizontales et en colonnes homogènes tridimensionnelles. Le tableau II.1 ci-après montre globalement les modèles utilisés dans le cadre de l'hydrodynamique.

Interception et Evapotranspiration	Kriston et Jensen (1975)
Ecoulement en zone non saturée	Richart (1931)
Ecoulement en zone saturée	Boussineq (1904)
Ruissellement	Ondes diffusive
Ecoulement dans le réseau hydrographique	Saint Venant (1871)

**Tableau II.1 :** Modélisation utilisée avec modèle hydrodynamique de MIKE SHE

Le transfert des polluants, les cinétiques, les processus d'adsorption/désorption ou encore les prélèvements racinaires est modélisé de manière classique (cinétique du premier ordre, isotherme d'adsorption...).

Du fait du caractère fortement mathématique de ce modèle, la connaissance préalable de nombreuses données s'avère indispensable. Nous notons entre autre la pluviométrie, les températures, l'occupation des sols, le type de culture, la texture des sols, les usages des sols, la topographie. Toutefois, MIKE SHE dispose de nombreuses bases de données intégrées, ce qui lui confère un certain intérêt car la mise en place de campagne d'acquisition n'est pas indispensable que si l'utilisateur souhaite enrichir le plus possible la modélisation. Dans un premier temps, l'utilisation des banques de données peut se révéler suffisante.



**Figure II.6 :** Principe et fonctionnement de MIKE SHE.

Les applications typiques de ce logiciel sont :

- Aide à la gestion et à l'exploitation des ressources en eau d'un bassin
- Aménagement d'un bassin hydrographique ;
- Qualité des eaux souterraines et superficielles ;
- Irrigation, drainage et assainissement agricole ;

- Pollution agricole ou industrielle.

MIKE SHE est un outil s'utilisant :

- A différentes échelles spatiales (du simple profil de sol au bassin versant) ;
- A différentes échelles temporelles (quelques heures à plusieurs années) ;
- A une large plage de régimes hydrologiques et climatiques [Refsgaard, (1995)].

### 5. Modèle physique conceptuel semi-spatialisés (TOPMODEL) :

TOPMODEL est un modèle semi-distribué destiné à reproduire le comportement hydromorphologique d'un bassin versant. Ce modèle est encore utilisé et amélioré car sa relative simplicité et les bons résultats qu'il fournit sont autant de motivations à son développement. Ce modèle prédit, à chaque pas du temps, la distribution spatiale du contenu en eau au sein des différentes mailles du modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant considéré. Il est basé sur les concepts originaux de déficit en eau du sol par rapport à la saturation et à l'index topographique. Cette idée provient du fait que, depuis quelques années, la participation des écoulements souterrains aux variations des débits des rivières, même en période de fortes précipitations a été reconnue comme étant capitale. L'index topographique est utilisé pour déterminer, en fonction de la topographie du bassin, la quantité d'eau destinée au ruissellement et celle restant pour l'infiltration. La structure de ce modèle est illustrée sur la figure II.7.

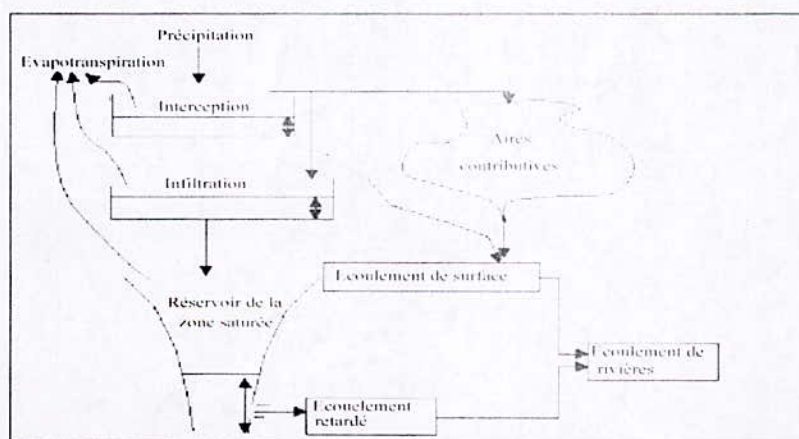


Figure II.7 : Structure du modèle TOPMODEL

TOPMODEL repose sur un découpage du bassin versant en sous-bassins homogènes (mailles carrées). Le sol et le sous-sol sont représentés par des réservoirs successifs, d'où le caractère conceptuel de ce modèle. Ce modèle, relativement puissant nécessite toutefois, bien évidemment, un certain nombre de données pour fonctionner, parmi lesquelles, nous notons les pluies horaires, l'évapotranspiration potentielle une cartographie de la transmissivité  $T_0$  et de la conductivité hydraulique verticale mesurée en surface,  $K_0$ . En effet, le modèle utilise une loi de décroissance de la conductivité avec la profondeur du type :

$$K_s(z) = K_0 e^{-fz}$$

- où,
- L'axe Z est orienté positivement vers le bas ;
  - $f$  est un facteur de décroissance.

## 6. Le modèle HYDROTEL

Le modèle hydrologique HYDROTEL simule six processus hydrologiques:

- Interpolation des données météorologiques ;
- Évolution et fonte du couvert nival ;
- Évapotranspiration potentielle ;
- Bilan d'eau vertical ;
- Écoulement sur la partie terrestre du bassin ;
- Écoulement dans le réseau hydrographique .

Pour certains de ces processus, HYDROTEL offre la possibilité de choisir différents sous modèles en fonction des données disponibles. Ainsi, lorsque suffisamment de données sont disponibles sur un bassin donné, il est possible d'utiliser des sous modèles plus précis basés sur les processus physiques. Dans d'autres cas, lorsque les données se font plus rares, des sous modèles plus conceptuels et moins gourmands en données sont disponibles. Ceci permet d'appliquer HYDROTEL à une large gamme de bassins, tout en utilisant les meilleures données.

HYDROTEL est un modèle hydrologique distribué. Ceci signifie que les calculs des processus précités sont effectués indépendamment sur des unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) de manière à pouvoir tenir compte de la variabilité spatiale de la topographie, de l'occupation du sol, des types de sols et des variables météorologiques à l'intérieur d'un bassin versant.

- Les unités de discrétisation d'HYDROTEL sont, selon les processus simulés, soit les UHRH ou les tronçons du réseau hydrographiques

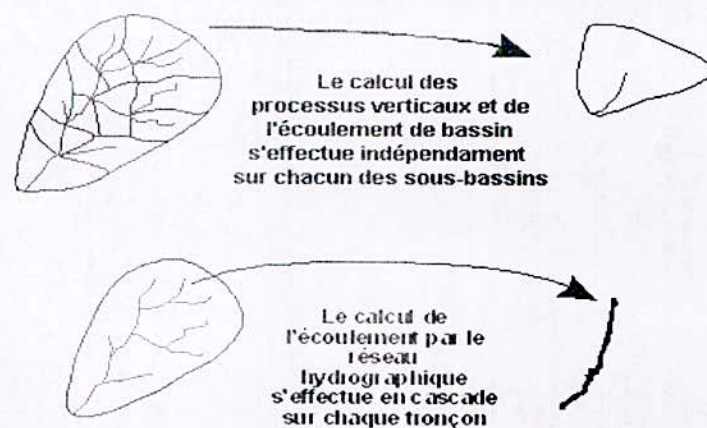


Figure II.8 : Les unités de discrétisation d'HYDROTEL

- Les calculs relatifs à l'interpolation des données météorologiques, l'évolution et la fonte du couvert nival, l'évapotranspiration potentielle, le bilan vertical et l'écoulement sur la partie terrestre du bassin s'effectuent indépendamment sur

chacune des UHRH associées aux tronçons définis par PHYSITEL. Ceci implique qu'HYDROTEL peut fournir des valeurs distribuées des principales variables associées aux processus précités sur l'ensemble des UHRH. HYDROTEL permet aussi de visualiser et archiver ces valeurs à l'aide de cartes. .

- Les calculs liés à l'écoulement par le réseau hydrographique s'effectuent sur chacun des tronçons définis dans PHYSITEL, et ce, en cascade, à partir des tronçons les plus en amont jusqu'au tronçon le plus en aval. HYDROTEL est donc en mesure de fournir des valeurs de débits pour chacune des tronçons du réseau hydrographique et non uniquement à l'exutoire du bassin. Ces débits peuvent être visualisés à l'aide de cartes et archivés.

HYDROTEL est conçu de manière à pouvoir fonctionner à des pas de temps de 1, 2, 3, 4, 6, 8,12 ou 24 heures, selon les données disponibles. Ceci en fait un outil très intéressant car il permet, sur un même bassin, de pouvoir utiliser divers pas de temps de simulation avec un minimum d'ajustement de l'étalonnage du modèle. Ainsi, comme c'est souvent le cas, il est possible que des données journalières soient disponibles pour une grande période de temps sur un bassin donné mais que les données horaires soient plus rares. Il est alors possible d'étalonner HYDROTEL à l'échelle journalière et d'ajuster par la suite à l'échelle horaire les quelques paramètres (1 ou 2) influencés par le changement de pas de temps, pour ainsi avoir un modèle prêt à fonctionner au pas de temps horaire sans avoir dû recourir à une quantité importante de données horaires historiques [Gaume, (2000)].

### **Conclusion**

L'utilisation d'un modèle hydrologique nécessite deux étapes : la préparation des données et l'enregistrement des résultats après simulation.

Pour cela, nous avons choisi un modèle qui est public le HEC-HMS, que nous présenterons dans le chapitre qui suit.

## Chapitre III : Présentation de HEC-HMS

### INTRODUCTION

Afin de simuler le comportement hydrologique d'un bassin versant, le logiciel HEC-HMS développé par Hydrologic Engineering Center du corps de l'armée américaine des ingénieurs, prend en compte les différents paramètres suivants :

- les précipitations : ces données peuvent correspondre à des relevés pluviométrique réels d'événement pluvieux ordinaire ou exceptionnel mais aussi à des événements pluvieux théoriques basés sur une étude statistique.
- Les pertes (par infiltration, retenues ou évapotranspiration, qui permettent d'évaluer le ruissellement à partir des précipitations et des caractéristiques du bassin versant.
- Les ruissellements directs qui prennent en compte les écoulements de surface, les stockages et les pertes de charges.
- L'hydrologie fluviale ; c'est-à-dire le comportement de l'eau lorsqu'elle se trouve dans le lit de la rivière.

Ces différents paramètres sont ensuite modélisés mathématiquement par un ensemble d'équations (dont celle de saint venant) qui permettent d'obtenir la réponse du système hydro-geologique global à un changement de conditions hydrométéorologique.

Nous allons ici donner les points principaux pour simuler le ruissellement des précipitations sur un bassin versant avec HEC-HMS [Henine, (2005)].

### I. MODELE DE BASSIN

#### I.1. Création d'un nouveau modèle de bassin

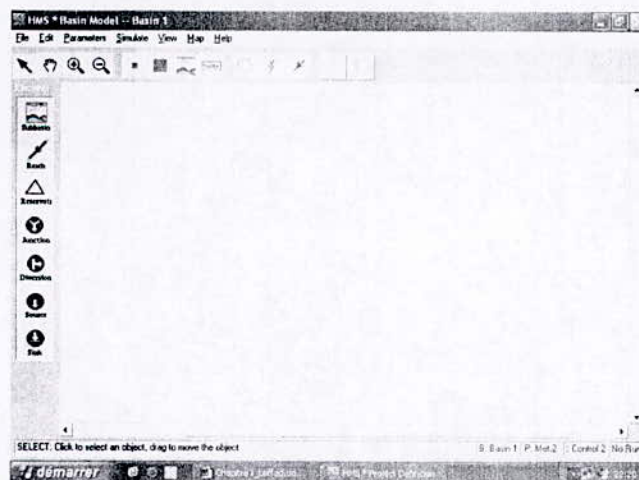


Figure III.1 : Fenêtre principale du modèle de bassin.

Après avoir créé un modèle de bassin (EDIT-Basin, Model-New), l'utilisateur doit rentrer les différents éléments hydrologiques caractéristiques participant au ruissellement sur le bassin versant. On peut inclure sept types d'éléments différents:

- Sous bassin



C'est un élément qui n'a pas d'entrée et juste une sortie. Son débit sortant est calculé par soustraction des pertes au ruissellement issu des précipitations, en ajoutant le débit de l'écoulement souterrain.

- **Bief (reach)**

C'est un élément avec une ou plusieurs entrées et une seule sortie. Le débit entrant provient des autres éléments du bassin, et le débit sortant est calculé à partir des différents modèles d'écoulements fluviaux à surface libre. Il est utilisé pour modéliser les rivières et les ruisseaux.

- **Réservoir**

C'est un élément avec une ou plusieurs entrées et une seule sortie. Le débit entrant provient des autres éléments du bassin, et le débit sortant est calculé à partir d'une relation stockage/débit spécifié par l'utilisateur tout en considérant que la surface de l'eau reste horizontale.

- **Jonction**

C'est un élément avec une ou plusieurs entrées et une seule sortie. Le débit sortant est calculé par simple conservation du débit. Elle représente la confluence entre deux ou plusieurs cours d'eau.

- **Bifurcation (diversion)**

Cet élément possède deux sorties et permet de modéliser comme son nom l'indique des bifurcations de rivières. L'utilisateur doit préciser la relation entre le débit entrant et le débit de la branche dérivée.

- **Sources**

Elles permettent comme les sous bassins de générer un débit dans le bassin versant. Elles peuvent être utilisées pour représenter les conditions aux limites du bassin.

- **Puits (sink)**

Ce sont des éléments sans débit sortant qui peuvent modéliser le point bas d'une zone d'infiltration ou l'exutoire du bassin versant.

Tous ces éléments peuvent être créés à partir de l'écran Modèle de Bassin qui est illustré dans la figure III.1.

Les éléments hydrologiques définis précédemment doivent être reliés pour créer un réseau. Cette création s'effectue en deux étapes :

- Créer les éléments et les placer sur le schéma.
- Les connecter.

## **I.2. Les éditeurs d'éléments**

Chacun des éléments précités possède un éditeur qui permet de sélectionner les méthodes de calcul permettant de les modéliser, mais aussi d'entrer les données caractéristiques.

- **L'éditeur de sous bassin** : Le fonctionnement hydrologique d'un sous bassin est caractérisé par seulement trois processus : les pertes (Loss rate), les ruissellements (Transform), les écoulements souterrains (Baseflow Method). On doit sélectionner

un modèle pour chacun de ces processus grâce aux trois onglets de l'écran d'éditeur de sous bassin.

- **L'éditeur de bief** : Cet éditeur permet de choisir entre les différents modèles d'écoulements fluviaux (Routing methods).
- **L'éditeur de réservoir** : Il faut ici que l'utilisateur fournisse la relation stockage/débit du réservoir. Trois différentes relations sont disponibles :
  - Stockage/débit ;
  - Hauteur d'eau/Stockage/débit ;
  - Hauteur d'eau/Surface/débit.

Pour chacun de ces modèles, un tableau permet de donner des valeurs de calage pour les différents paramètres (par ex., les débits observés en fonction du volume d'eau dans le réservoir pour le premier modèle). Le logiciel n'extrapole pas de relation à partir des données fournies; les valeurs données doivent donc couvrir entièrement la plage que l'on veut étudier.

- **L'éditeur de confluence** : Il suffit de donner un nom à la confluence.
- **L'éditeur de bifurcation** : L'utilisateur entre dans un tableau la relation entre les débits entrants et les débits dérivés.
- **L'éditeur de source** : Le débit fourni par la source peut être soit constant, soit variable. Dans ce dernier cas, un hydrogramme doit avoir été entré précédemment dans le projet; il suffit alors de rappeler son nom.
- **L'éditeur de puits** : Il suffit là aussi de donner un nom à l'élément.

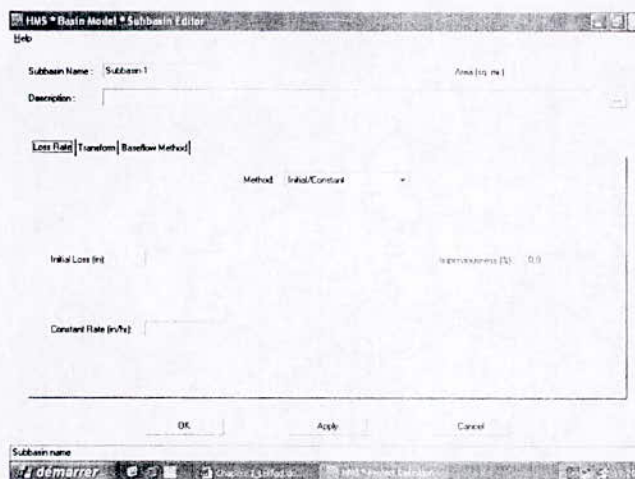


Figure III.2 : Fenêtre des paramètres des sous bassins

#### a. Modélisation des pertes (Loss rate)

HEC-HMS calcule les volumes d'écoulements en soustrayant aux précipitations les quantités d'eau qui sont stockées, infiltrées ou évaporées sur le bassin versant. L'interception, l'infiltration, le stockage et l'évaporation sont représentés par le HEC comme étant des « pertes ».

Les surfaces d'un bassin versant sont classées en deux catégories :

1. Surfaces directement connectées et imperméables, où l'écoulement est direct et se fait sans pertes. Dans ce cas, on utilise le modèle « sans pertes » ;
2. Surfaces perméables soumises à des pertes décrites par les différents modèles suivants :
  - Modèle de perte initiale et à taux constant ;
  - Modèle à déficit et à taux de perte constant ;
  - Modèle basé sur le Curve Number (CN) ;
  - Modèle de Green et Ampt.

Pour tous ces modèles, les pertes sont calculées pour chaque intervalle de temps et soustraites à la moyenne surfacique des précipitations de cet intervalle. La quantité d'eau restante désigne l'excès de précipitation. Cette quantité est considérée uniforme sur tout le bassin versant et représente le volume d'écoulement de surface.

### *i. Le modèle de pertes initiales et à taux constant*

Ce modèle considère que le potentiel du taux de pertes maximum, noté  $f_c$ , est constant, et inclut le taux de pertes initiales  $I_a$  qui représente l'interception et le stockage dans les dépressions de surfaces. L'interception est une conséquence de l'absorption de la pluie par le couvert végétal et le stockage de surface est la conséquence de la topographie du bassin versant : l'eau stockée dans les dépressions de surface sera soit évaporée soit infiltrée. Tant que  $I_a$  n'est pas atteinte, il n'y a pas de ruissellement.

On peut résumer ce fonctionnement de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \oplus \quad & \text{Si } \sum_i P_i \leq I_a \text{ alors, } P_{et} = 0 \\ \oplus \quad & \text{Si } \sum_i P_i \geq I_a \text{ et } P_t \geq f_c \text{ alors, } P_{et} = p_t - f_c \\ \oplus \quad & \text{Si } \sum_i P_i \geq I_a \text{ et } P_t \leq f_c \text{ alors, } P_{et} = 0 \end{aligned}$$

où,  $P_t$  : La moyenne surfacique des précipitations au temps  $t$  ;  $P_{et}$  : le ruissellement au temps  $t$  donné par :

$$P_{et} = \begin{cases} P_t - f_c & \text{si } P_t > f_c \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

La difficulté de cette méthode réside dans la détermination des pertes initiales et du taux de pertes constantes. La première dépend des conditions qui ont précédés l'évènement pluvieux à étudier (par exemple si le sol était déjà saturé en eau par des pluies précédentes, les pertes initiales seront quasiment nulles). Ces pertes dépendent aussi de l'aménagement et de la nature des sols. Le second dépend des propriétés physiques du sol du bassin et de la nature du sol.

Si le sol du bassin versant est saturé,  $I_a$  sera proche de zéro. Si le sol est drainé, alors  $I_a$  représentera la quantité d'eau qui tombe sur le bassin versant sans qu'il y ait de ruissellement ; cette quantité est fonction de la nature de terrain du bassin versant, occupation du sol, type et utilisation du sol. A titre indicatif, on estime que ces pertes sont

égales à 10 ou 20% de la pluie totale pour une forêt, alors qu'en zone urbaine elles sont comprises entre 2 et 5 mm de hauteur d'eau.

Le taux de perte constant qui correspond au pouvoir d'absorption du sol est exprimé en mm/h. On peut toutefois se servir des valeurs données dans le tableau suivant :

**Tableau III.1** : le taux de pertes constant pour les différents types du sol.

Type du sol	Ordre de grandeur du taux de pertes (mm/h)
Sable profond, lœss profond, limons agrégés	7.5 à 11
Lœss peu profond, terre sableuse	3.5 à 7.5
Terre argileuse, terre sableuse peu profonde, sols à faible teneur en matière organique, sols argileux	1.2 à 3.5
Sols gonflant fortement sous l'effet de l'eau, argiles plastiques lourdes, sols salins.	0 à 1.2

Une variante de ce modèle est le modèle quasi continu qui prend en compte des périodes sans pluie au cours de l'évènement et qui intègre donc une régénération (avec un taux à fixer) des pertes initiales. C'est le modèle "Déficitaire et à taux constant". Pour utiliser ce modèle avec le HEC-HMS on doit spécifier le taux de pertes initiales, le taux de pertes constant et le taux de régénération. Ce dernier peut être estimé comme étant la somme du taux d'évaporation et du taux de percolation [Hasnaoui, (2003)].

### *ii. Le modèle du Curve Number (CN)*

Ce modèle estime l'excès des précipitations comme une fonction des précipitations cumulées, de la couverture et de l'humidité initiale du sol à partir de l'équation suivante :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (\text{III- 2})$$

où,  $P_e$  : L'excès des précipitations ;  $P$  : est le total des précipitations accumulées au temps  $t$  ;  $I_a$  : Les pertes initiales et  $S$  : est le potentiel maximum de rétention.

On a par ailleurs la relation empirique ci-dessous, qui a été développée à partir d'une analyse menée sur un ensemble de petits bassins versants expérimentaux qui donne  $I_a$  en fonction de  $S$  :

$$I_a = 0.2S \quad (\text{III- 3})$$

On obtient donc :

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (\text{III- 4})$$

Le potentiel de rétention maximum,  $S$ , et les caractéristiques du bassin versant sont reliées par l'intermédiaire du nombre de courbe CN (Curve Number) par :

$$S = \frac{25400 - 254 \text{ CN}}{\text{CN}} \quad (\text{III- 5})$$

CN peut être estimé comme une fonction du type du sol, d'occupation du sol et des conditions hydriques précédentes du bassin versant : ce nombre peut être estimé à partir

des tables des données en annexe A du manuel de référence technique HEC-HM, qui expriment CN en fonction du type de la couverture végétale.

Pour un bassin versant composé de différents types de sols ou de couvertures végétales, on peut établir un CN moyen par la relation suivante :

$$CN_{\text{moy}} = \frac{\sum_i a_{ij} CN_i}{\sum_i A_i} \quad (\text{III- 6})$$

où,  $j$  : L'indice associé à la subdivision du bassin de type de sol uniforme ;  $a_{ij}$  : l'aire de la subdivision  $j$  dans le sous-bassin  $i$  et  $A_i$  : l'aire du sous-bassin  $i$ .

### ***iii. La méthode CN en grille***

Une autre alternative de la méthode de CN qui peut être utilisée par le HEC-HMS est celle de CN en grille. Avec cette option, la subdivision de l'équation (III-2) sera des cellules d'une grille, dans la base de données, où chaque cellule doit inclure : sa localisation, sa distance de l'exutoire, ses dimensions et son CN (qui est donné en fonction du type de sol). Ainsi, le HEC calcule l'excès des précipitations pour chaque cellule indépendamment en utilisant l'équation (III-2), ensuite, il calcule l'excès total au niveau de l'exutoire en utilisant la méthode de ModClark (cette méthode sera présentée dans la section suivante). Ce qui veut dire que la méthode de CN en grille n'est compatible qu'avec cette méthode de calcul.

### ***iv. Le modèle de Green & Ampt***

Il est l'un des plus utilisés, c'est un modèle conceptuel d'infiltration et de précipitation. Sa fonction de production est basée sur la loi de Darcy généralisée aux milieux non saturés combinée avec le principe de conservation de la masse. Les pertes sur les zones perméables sont calculées par la formule suivante :

$$f_t = K \left[ \frac{1 + (\phi - \theta_i) S_f}{F_t} \right] \quad (\text{III- 7})$$

où,  $K$  : Conductivité hydraulique saturée ;  $\phi$  : la porosité ;  $(\phi - \theta_i)$  : le volume du déficit hydrique ;  $S_f$  : un paramètre tabulé qui exprime l'aspiration avant mouillage ;  $F_t$  : représente les pertes cumulées aux temps  $t$ .

L'excès des précipitations est calculé, ensuite, en soustrayant à la moyenne surfacique des précipitations ( $P_{\text{moy}}$ ) pour le même intervalle de temps les pertes calculées par l'équation précédente.

### ***v. Le modèle continue SMA (Sol-Moisture Accounting)***

Contrairement aux modèles précédents, SMA est un modèle qui permet d'étudier de longues périodes avec alternance de la pluie et du temps sec. Le modèle simule le mouvement de l'eau à travers les différents éléments d'un bassin versant. A partir des données de précipitations et d'évapotranspiration, le modèle calcule le ruissellement de surface, les infiltrations et les pertes dues à l'évapotranspiration et les percolations profondes.

Le modèle SMA représente le bassin versant avec une série de couches de stockage interconnectées entre elles.

vi. Quelques Avantages et inconvénients des modèles

Tableau III- 2 : Les avantages et les inconvénients du modèle de ruissellement inclus dans HEC-HMS.

Modèle	Avantages	Inconvénients
Modèle de pertes initiales et à taux constant et le modèle déficitaire à taux constant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ces modèles ont été utilisés avec succès dans plusieurs essais aux Etats Unis.</li> <li>• Faciles à installer et à utiliser.</li> <li>• Les modèles incluent seulement quelques paramètres nécessaires qui expliquent la variation du volume de l'écoulement.</li> <li>• Le modèle à déficit peut être utilisé pour des simulations à long terme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficile de l'appliquer pour un bassin non jaugé en raison du manque de rapport physique direct entre les paramètres et les propriétés du bassin.</li> <li>• Le modèle paraît très simplifié pour prévoir les pertes au cours de l'événement, même s'il prévoit bien les pertes totales.</li> </ul>
La méthode de Curve Number (CN)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode est simple, prévisible et stable.</li> <li>• Compte seulement sur un paramètre, qui change en fonction du type de sol, de l'occupation et l'utilisation de la terre, les conditions en surface, et l'état antécédent d'humidité.</li> <li>• Méthode bien établie, largement admise pour l'usage aux USA et à l'étranger.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La méthode ne tient pas compte de la théorie des écoulements non saturés.</li> <li>• Le taux d'infiltration approchera zéro pour une précipitation à longue durée, plutôt que constante.</li> <li>• Ce modèle a été développé avec des données de petits bassins versants agricoles aux Etats Unis, donc son applicabilité ailleurs est incertaine.</li> <li>• L'abstraction initiale par défaut (0.2S) ne dépend pas des caractéristiques de la pluie, donc si elle est utilisée, elle sera la même pour des averses à des périodes de retour différentes.</li> <li>• La méthode ne tient pas compte de l'intensité des précipitations</li> </ul>

La méthode de Green & Ampt	- Les différents paramètres peuvent être estimés à partir des informations sur le sol, pour des bassins versants non jaugés.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ce modèle n'est pas trop utilisé par les professionnels.</li> <li>• Il est moins efficace que les modèles empiriques</li> </ul>
----------------------------	--	--

### b. Modélisation du ruissellement direct (Transform)

Dans cette partie, on présente les modèles qui simulent le processus du ruissellement direct des précipitations excédentaires sur un bassin versant. HEC-HMS se rapporte à ce processus comme transformation de l'excès de précipitation pour chacun des sous bassin en un écoulement à son exutoire. Avec le HEC-HMS, il existe deux options pour calculer le volume de ruissellement :

- Un modèle empirique : Le but de ce type de modèle est d'établir un lien causal entre le ruissellement et l'excès de précipitation sans considérations détaillées des processus internes. Les équations et les paramètres du modèle ont une signification physique très limitée.
- Un modèle conceptuel : Le modèle conceptuel inclus dans HEC-HMS est le modèle de l'onde cinématique de l'écoulement de surface. Il représente, le mieux possible, les mécanismes physiques qui régissent le mouvement de l'excès de précipitation sur la surface et dans les petits canaux du bassin versant [Henine, (2005)].

#### *i. Les modèles liés à la méthode de l'hydrogramme unitaire (HU)*

Ces modèles donnent une relation empirique entre l'excès de précipitations et le ruissellement direct. La méthode de l'hydrogramme unitaire vise à déterminer l'hydrogramme de ruissellement direct à l'exutoire d'un bassin versant à partir des hydrogrammes de l'averse correspondante reçue par ce même bassin.

L'hydrogramme unitaire donne le débit de ruissellement par unité de hauteur d'eau tombée sur le bassin versant. Cette méthode repose donc principalement sur l'hypothèse de linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissellement.

On a donc l'équation de convolution suivante :

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq m} P_m U_{n-m+1} \quad (\text{III- 8})$$

où,  $Q_n$  est le débit de ruissellement au temps  $n \Delta t$ ,

$P_m$  est l'excès de précipitation entre  $m \Delta t$  et  $(m+1) \Delta t$  (en hauteur d'eau),

$U_{n-m+1}$  est la valeur de l'hydrogramme unité au temps  $(n-m+1) \Delta t$ .

Cette méthode repose sur l'ensemble des hypothèses suivantes :

- La distribution spatiale de l'excès de précipitations doit être uniforme et son intensité reste constante durant l'intervalle de temps  $\Delta t$  ;
- La linéarité entre l'excès de précipitations et le ruissellement direct ;
- L'hydrogramme unitaire résultant est indépendant des précipitations antécédentes ;

- L'excès de précipitation en un pas de temps donné est censé produire un hydrogramme, avec un temps équivalent, indépendamment de l'intensité des précipitations.

#### *α. Hydrogramme unitaire spécifié par l'utilisateur*

Ce modèle consiste à déterminer l'hydrogramme unitaire à partir de la formule (III-8) et des données complètes d'un événement pluvieux. En pratique, cette méthode n'est que très peu utilisée car elle nécessite des données trop complètes. De plus, l'hydrogramme obtenu ne pourra s'appliquer qu'à des événements pluvieux qui ont la même durée.

#### *β. Hydrogramme unitaire paramétrique*

Un hydrogramme unitaire paramétrique est obtenu par calcul à partir de plusieurs paramètres. Par exemple, l'amplitude et l'instant du pic suffisent à calculer entièrement un hydrogramme unitaire triangulaire. Un hydrogramme unitaire synthétique met en relation les paramètres d'un hydrogramme unitaire paramétrique et les caractéristiques du bassin versant. Cette méthode permet d'adapter l'hydrogramme unitaire obtenu dans certaines conditions pour un bassin versant à d'autres conditions et d'autres bassins versants. Par exemple, on peut relier l'amplitude du pic d'un hydrogramme unitaire triangulaire à l'aire drainée par le bassin [Hasnaoui, (2003)].

### *ii. Modèles d'hydrogramme unitaires synthétiques*

#### *α. Le modèle de SNYDER*

Ce modèle permet d'estimer l'hydrogramme unitaire à partir des caractéristiques du bassin versant. Il est basé sur trois paramètres : l'amplitude du pic, la base du temps total et le décalage entre le maximum de l'hydrogramme de la pluie excédentaire et le pic de l'hydrogramme. Ce modèle est fondé par ailleurs sur un événement standard tel que le décalage temporel ( $t_p$ ) qui est déterminé par la relation suivante :

$$t_p = 5.5.t_r \quad (\text{III-9})$$

où :  $t_r$  est la durée de l'évènement.

Si le décalage temporel est remarquablement différent du temps calculé par la relation précédente, on utilise la relation suivante :

$$t_{pR} = t_p - \frac{t_r - t_R}{4} \quad (\text{III-10})$$

où,  $t_R$  : Le décalage temporel de l'hydrographe désiré (défini par l'utilisateur) ;  $t_{pR}$  : Le décalage temporel de l'hydrogramme unitaire (défini par l'utilisateur).

Pour ce type d'évènement, Snyder a établi une relation entre le décalage temporel et le pic de l'hydrogramme unitaire.

$$\frac{U_p}{A_d} = C \frac{C_p}{t} \quad (\text{III- 11})$$

où,  $U_p$  : Le pic de l'hydrogramme unitaire ;  $A_d$  : La surface drainée ;  $C_p$  : Coefficient du pic de l'hydrogramme unitaire ;  $C$  : Constante de conversion=2.08 pour le Système



international d'unités (SI) ;  $t$  : Le temps de décalage. Il est égal à  $t_p$  pour des événements standards et à  $t_{pR}$  pour d'autres durées.

### ***β. Le modèle du SCS (Soil Conservation Service)***

Ce modèle repose sur l'hydrogramme unitaire normalisé (qui est la moyenne de nombreux hydrogrammes unitaires calculés pour différents bassins versant). Cet hydrogramme normalisé représente le débit d'écoulement,  $U_t$ , comme une fraction du débit maximal,  $U_p$ , et,  $T_p$ , l'instant du pic. On a par ailleurs les relations empiriques suivantes :

$$U_p = 2.08 \frac{\Delta t}{T_p} \text{ et } T_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6T_c \quad (\text{III-12})$$

où,  $\Delta t$  : La durée de l'excès de précipitation ;  $T_c$  : le temps de concentration du bassin.

Ainsi, il suffit de connaître le temps de concentration pour remonter à  $T_p$  et  $U_p$  et d'obtenir ainsi l'hydrogramme unitaire désiré par simple multiplication de l'hydrographe unitaire normalisé.

### ***χ. Le modèle de CLARK (ModCLARK)***

Il s'agit d'un modèle quasi-conceptuel puisqu'il prend en compte les deux processus intervenant dans la transformation d'un excès de précipitation en ruissellement, à savoir le mouvement de l'eau de son origine jusqu'à l'exutoire du bassin versant et l'atténuation de cette quantité d'eau par stockage lors de son parcours. Le modèle de Clark modifié, fait intervenir un maillage du bassin versant qui permet de mieux modéliser les temps de parcours.

Une fois que l'excès de précipitation est déterminé pour chaque grille du maillage du bassin versant, le temps de transfert de l'excès de précipitation de la grille à l'exutoire est calculé par la relation suivante :

$$t_{\text{cell}} = t_c \frac{d_{\text{cell}}}{d_{\text{max}}} \quad (\text{III-13})$$

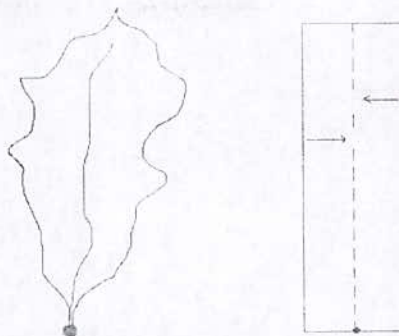
où,  $t_{\text{cell}}$  : Temps de transfert de l'excès de précipitations de la grille ;  $t_c$  : Temps de concentration du bassin versant ;  $d_{\text{cell}}$  : Distance entre la grille et l'exutoire du bassin versant ;  $d_{\text{max}}$  : Le plus long parcours du bassin versant.

### ***iii. Modèle de l'onde cinématique***

Il s'agit d'un modèle conceptuel qui représente les versants du bassin comme des canaux à surface libre dont le débit entrant correspond à l'excès de précipitations. Il résout donc les équations (de continuité et de quantité du mouvement) qui régissent les écoulements instationnaires en eau peu profonde pour tracer l'hydrogramme de ruissellement.

Le bassin versant étant découpé en deux plans séparés par le cours d'eau dans lequel les écoulements se déversent (figure III.3). Le modèle de l'onde cinématique représente les écoulements de surface sur ces plans.

**Figure III.3:** Modélisation d'un modèle de bassin pour le modèle d'onde cinématique



Sans rentrer dans la théorie complète, on retiendra que sous quelques hypothèses simplificatrices, l'équation de mouvement et celle de continuité donnent :

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \alpha^{m-1} \frac{\partial A_T}{\partial x} = q \quad \text{avec,} \quad \alpha = 1.486 \frac{S^{0.5}}{n} \quad \text{et} \quad m = 5/3n \quad (\text{III-14})$$

où,  $A_T$  : La section transversale ;

$S$  : est la pente ;

$n$  : est un coefficient de rugosité tabulé ;

$q$  : est le débit d'apport latéral par unité de longueur du canal.

HEC-HMS représente les écoulements de surface sur un canal rectangulaire de largeur unité. Cette méthode est aussi utilisée pour les écoulements fluviaux. Dans les deux cas, la résolution des équations se fait par la méthode des différences finies pour assurer la précision et la stabilité. Pour utiliser la méthode de l'onde cinématique dans la modélisation du ruissellement, le bassin versant est décomposé en divers éléments :

- Les plans de ruissellement de surface ;
- Les canaux de collection ;
- Le cours d'eau principal.

Les informations nécessaires à connaître pour chacun de ces éléments sont représentées sur le tableau ci-dessous.

**Tableau III-3 :** Diverses informations à connaître pour chaque élément du bassin.

Plans de ruissellement de surface	Collecteurs	Cours d'eau principal
Longueur caractéristique	Aire drainée par le canal	Longueur du canal
Pente représentative	Longueur caractéristique	Pente du canal
Coefficient de rugosité	Pente du canal	Forme de la section
Aire représentée par le plan	Forme de la section	Dimensions représentatives de la section
Paramètres de pertes	Dimensions représentatives de la section	Coefficient de Manning
	Coefficient de Manning	

Le choix du modèle de ruissellement direct dépend essentiellement de la disponibilité des données pour le calage ou pour l'estimation de certains paramètres, de la pertinence des

hypothèses faites pour chaque modèle par rapport au cas étudié et de l'expérience que peut avoir l'utilisateur face aux divers modèles [Henine, (2005)].

### c. La modélisation des écoulements souterrains (Base flow method)

Le logiciel HEC-HMS permet aussi de modéliser, en plus des ruissellements et des précipitations, les écoulements souterrains. Ces écoulements prennent en compte à un instant donné :

- Les précipitations antérieures stockées temporairement dans les nappes souterraines;
- Les ruissellements dans le sous-sol dus à la tempête actuelle.

HEC-HMS propose trois modèles d'écoulement souterrain au choix :

#### i. Le modèle constant

Cette modélisation est la plus simple des trois. Elle considère l'écoulement souterrain comme constant pendant des durées d'un mois. Ce débit supplémentaire est ainsi additionné au ruissellement direct issu des précipitations à chaque itération du calcul global.

Pour pouvoir utiliser ce modèle, on doit connaître la valeur du débit de ces écoulements souterrains lorsqu'il n'y a pas de tempête, grâce à des mesures sur le terrain. Pourtant cet écoulement peut être négligé dans le cas de petits bassins versants et pour la plupart des bassins versant dits urbains.

#### ii. Le modèle à récession exponentielle

Dans ce cas, on modélise le débit souterrain à un instant  $t$ ,  $Q_t$  par la formule :

$$Q_t = Q_0 K \quad (\text{III-15})$$

où :  $Q_0$  est le débit souterrain à l'instant  $t = 0$ , et  $K$  est défini comme le rapport du débit souterrain au temps  $t$  sur celui du lendemain.

La modélisation de  $Q_t$  peut être appliquée à la fois au début du modèle ou après un certain intervalle de temps appelé seuil, défini comme le temps au bout duquel le débit global a atteint une certaine proportion de son pic d'intensité maximale (10% par exemple).

$Q_0$  est défini comme le débit moyen qui existe au début des précipitations mais est souvent ajusté à la valeur du débit moyen annuel. La constante  $k$  dépend quant à elle du bassin versant étudié et varie de 0.3 à 1 :  $K \approx 1$  pour des grands bassins versants; et  $K$  se rapproche de 0.3 pour des petits bassins versants.

#### iii. Le modèle à réservoir linéaire

Ce modèle est utilisé en relation avec le modèle SMA présenté auparavant. Il compare le stockage et le mouvement de l'eau souterraine aux stockages et aux mouvements de l'eau dans un réservoir. Ce réservoir est dit linéaire car le débit sortant à chaque itération est une fonction linéaire du stockage moyen durant un pas de temps [Henine, (2005)].

### I.3 Modélisation des écoulements fluviaux avec HEC-HMS

Les différents modèles d'écoulements fluviaux inclus dans le HEC-HMS permettent de calculer un hydrogramme en aval du bassin versant, connaissant l'hydrogramme amont. Tous ces modèles utilisent les équations de continuité et de quantité de mouvement :

#### a. Equation de continuité

Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q \quad (\text{III-16})$$

où,  $B$  : Largeur de la surface libre ;  $q$  : Le débit unitaire, calculé par unité de longueur du canal et  $A$  : L'aire de la section du cours d'eau ;

#### b. Equation de quantité de mouvement

L'équation du mouvement s'écrit comme suit :

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (\text{III-17})$$

où,  $S_f$  : est le gradient hydraulique ;  $S_0$  : est le gradient au fond du canal ;  $V$  : vitesse d'écoulement ;  $y$  : hauteur hydraulique ;  $x$  : la longueur du chemin de l'écoulement ;  $\frac{\partial y}{\partial x}$  :

le gradient de pression ;  $\frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x}$  : l'accélération convective et  $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  : l'accélération locale.

Les principales hypothèses retenues lors de l'élaboration des ces équations sont :

- La vitesse est constante sur la surface et elle reste horizontale sur chaque section du cours d'eau ;
- La pression reste hydrostatique en chaque point du cours d'eau ;
- Aucune circulation latérale et secondaire ne se produit ;
- Le lit du canal est fixé ; l'érosion et le dépôt ne changent pas la forme de la section du canal ;
- La résistance à l'écoulement peut être décrite par des formules empiriques, telles que l'équation de Manning ou de Chézy.

#### i. Modèle de Puls (modified puls)

Ce modèle est basé sur une approximation en différences finies de l'équation de continuité, et sur une représentation empirique de l'équation de quantité de mouvement. On considère qu'il n'y a pas d'apports latéraux. L'équation de continuité devient alors :

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{III-18})$$

On utilise alors la méthode des différences finies en écrivant que :

$$I_t - O_t = \frac{\Delta S_t}{\Delta t} \quad (\text{III-19})$$

où  $I_t$  et  $O_t$  sont les débits moyen respectivement amont et aval pendant une période  $\Delta t$ ,  $\Delta S_t$ , étant la variation du stock d'eau durant le même pas de temps.

On obtient alors l'équation suivante :

$$\left(\frac{S_t + O_t}{\Delta t}\right) = \left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) + \left(\frac{S_{t-1} - O_{t-1}}{2}\right) \quad (\text{III-20})$$

Ainsi, au temps  $t$ , on connaît les termes de droite, et l'on cherche à déterminer les termes de gauche. On a donc deux inconnues  $S_t$  et  $O_t$ , et l'on doit donc connaître une relation supplémentaire entre ces deux variables. Une fois cette relation déterminée, on résout le nouveau système d'équations par récurrence. En ce qui concerne la relation liant  $S_t$  à  $O_t$ , on peut la déterminer par des observations historiques des valeurs des débits et du volume d'eau stocké au cours du temps [Lemieux, (2001)].

### ***ii. Modèle de Muskingum***

Ce modèle utilise comme le modèle précédent une approximation simple en différences finies de l'équation de continuité :

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2}\right) = \left(\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t}\right) \quad (\text{III-21})$$

On écrit ensuite que le volume d'eau stocké est la somme d'un volume stocké constant et d'une variation du stock :

$$S_t = T_p O_t + T_p X (I_t - O_t) = T_p (X I_t + (1 - X) O_t) \quad (\text{III-22})$$

avec,  $T_p$ : Temps de parcours et  $X$  paramètre permettant une pondération ( $0 < X < 0.5$ ).

Ainsi, si le stockage d'eau dans la rivière est contrôlé par les conditions aval, on met  $X=0$  (On retrouve alors le modèle de réservoir linéaire présenté plus haut). Au contraire, on prendra  $X=0.5$ , pour donner un poids similaire aux débits entrants et sortants.

Finalement, on obtient l'équation suivante :

$$O_t = \left(\frac{\Delta t - 2T_p X}{2T_p(1-X) + \Delta t}\right) I_t + \left(\frac{\Delta t + 2T_p X}{2T_p(1-X) + \Delta t}\right) I_{t-1} + \left(\frac{2T_p(1-X) - \Delta t}{2T_p(1-X) + \Delta t}\right) O_{t-1} \quad (\text{III-23})$$

Connaissant les valeurs de  $T_p$ ,  $X$ ,  $\Delta t$  pour tous les instants  $t$ , et de la condition initiale ( $O_0$ ). HEC-HMS calcule par récurrence l'hydrogramme amont.

Les paramètres  $T_p$  et  $X$  peuvent être évidemment estimés par une série d'essais successifs corrigés au fur et à mesure.  $T_p$ , peut être aussi mesuré comme l'intervalle de temps entre deux points similaires appartenant respectivement aux hydrogrammes amont et aval [Lemieux, (2001)].

### ***iii. Le modèle du décalage (lag model)***

Ce modèle est le plus simple de tous et est extrêmement utilisé surtout pour modéliser le drainage urbain. On considère que l'hydrogramme aval est simplement l'hydrogramme amont décalé dans le temps d'une certaine durée (lag): La valeur de ce décalage peut être estimée comme la durée entre les deux pics des deux hydrographes (ou leurs centres de gravité respectifs).

### ***iv. Le modèle de l'onde cinématique***

Ce modèle est basé sur une approche différences finies de l'équation de continuité et une approche simplifiée de l'équation du mouvement. Cette approche est décrite en détail dans la section précédente. Les informations nécessaires à ce modèle sont :

- Le type de la section du cours d'eau : trapézoïdale, rectangulaire ou circulaire ;
- Les dimensions principales : la base de la section du canal, le diamètre de la conduite ;
- Pente des berges ;
- La longueur du bief ;
- La pente de ligne d'énergie ;
- Coefficient de la rugosité de Manning ( $n$ ).

#### v. Le modèle Muskingum-Cunge

Le modèle Muskingum est facile à utiliser mais emploie des paramètres qui n'ont pas de signification physique et qui sont donc difficiles à évaluer. De plus ce modèle est basé sur des approximations qui s'avèrent souvent fausses. Le modèle de Muskingum-Cunge évite ces erreurs. Il est basé sur l'équation de continuité incluant un débit latéral et sur la forme diffusive de l'équation de quantité de mouvement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial X} &= q \\ S_f &= S_0 - \frac{\partial Y}{\partial X} \end{aligned} \quad (\text{III-24})$$

En combinant ces deux équations, on obtient alors l'équation de diffusion-convection de Miller et Cunge, 1975.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial X} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} + cq_l \quad (\text{III-25})$$

avec,  $c$  : La célérité et  $\mu$  : La diffusivité hydraulique définie par :

$$c = \frac{\partial Q}{\partial X}, \quad \mu = \frac{Q}{2BS_0} \quad (\text{III-26})$$

L'approximation en différences finies des dérivées partielles permet d'obtenir l'équation suivante :

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q_l \Delta X) \quad (\text{III-27})$$

$$\begin{aligned} \text{avec, } C_1 &= \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} & C_2 &= \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \\ C_3 &= \frac{-\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} & C_4 &= \frac{2\frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1-X)} \\ K &= \frac{\Delta X}{c} & X &= 0.5 \left( 1 - \frac{Q}{BS_0 \Delta X} \right) \end{aligned} \quad (\text{III-28})$$

$C$ ,  $Q$ ,  $B$  et les quatre paramètres  $C_i$  sont des variables. Ils sont recalculés à chaque pas de temps et d'espace par HEC-HMS.

En conclusion, pour les différents paramètres des modèles cités ci avant, le tableau ci-dessous présente les valeurs minimales et maximales des différents modèles acceptées par le logiciel HEC-HMS [Henine, (2005)].

**Tableau III.4** : les valeurs minimales et maximales des différents modèles acceptées par HEC-HMS.

Modèle	Paramètre	Minimum	Maximum
Perte initiale et à taux constant	Perte initiale	0 mm	500mm
	Taux de perte constant	0mm/h	300mm/h
Modèle de perte SCS	Rétention initiale	0 mm	500 mm
	Curve Number (CN)	1	100
Modèle de perte de GREEN et AMPT	Déficit hydrique	0	1
	Conductivité hydraulique	0 mm/h	250mm/h
	Wetting front suction	0 mm	1000 mm
Hydrographe unitaire de CLARK	Temps de concentration	h	500 h
	Coefficient de stockage	0 h	150 h
Hydrographe unitaire de SNYDER	Décalage	0.1 h	500 h
	Cp	0.1	1.0
Hydrographe unitaire du SCS	Décalage	0.1 min	30 000min
Onde cinématique	Coefficient de Manning (n)	0	1
Ecoulement souterrain	Ecoulement souterrain initial	0 m3/s	100 000m3/s
	Facteur de récession	0.000011	-
	Rapport débit/pic max	0	1
Modèle de Muskingum	K	0.1 h	150h
	X	0	0.5
Onde cinématique pour les écoulements fluviaux	Nombre de pas	1	100
	Facteur N	0.01	10
Décalage	Décalage	0 min	30 000 min

## II. MODELES METEOROLOGIQUES

Les modèles météorologiques sont au même titre que le modèle de bassin indispensables à la simulation. Ils regroupent les données des précipitations et d'évapotranspiration nécessaires au calcul de la réponse hydrologique du bassin versant.

Après avoir créé un nouveau modèle météorologique (Edit-Météorologic Model-New), l'écran modèle météorologique apparaît avec deux onglets (Précipitation, Evapotranspiration).

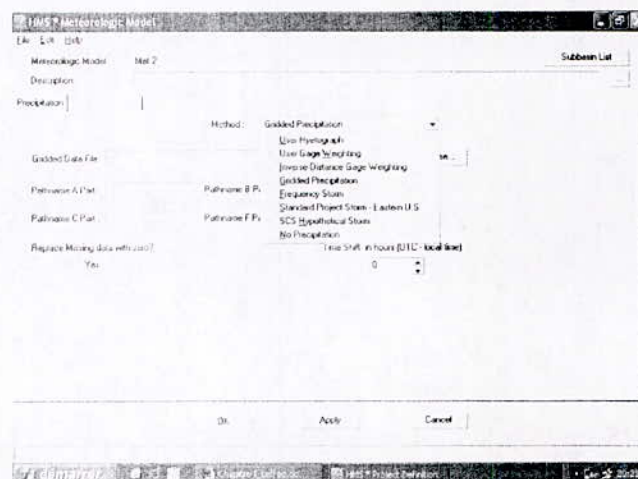


Figure III.4 : Fenêtre du modèle météorologique.

## II.1. Modélisation des précipitations

On peut fournir au logiciel trois types de données concernant les précipitations:

- Des relevés pluviométriques d'un événement réel;
- Des hauteurs d'eau théoriques obtenues à partir d'une étude fréquentielle;
- Des données relatives à un événement extrême (pluie de projet).

### a. Méthodes basées sur les coefficients de pondération

#### *i* Précipitation moyenne

À partir des relevés pluviométriques mesurés sur le bassin versant (ou à proximité), on calcule la moyenne surfacique des précipitations ( $P_{moy}$ ). Elle est obtenue par la moyenne arithmétique après avoir affecté un coefficient de pondération pour chaque station pluviométrique :

$$P_{moy} = \frac{\sum_i \left( w_i \sum_T p_i(t) \right)}{\sum_i w_i} \quad (\text{III- 29})$$

où,  $w_i$  : Coefficient de pondération affecté au pluviomètre  $i$  et  $P_i(t)$  : hauteur des précipitations mesurée au pluviomètre  $i$  au temps  $t$ .

Les coefficients de pondération peuvent être calculés par des considérations surfaciques où le poids affecté à un pluviomètre est d'autant plus grand qu'il est représentatif d'une grande surface. On peut choisir pour cela, soit la méthode des polygones de Thiessen, soit celle du tracé des isohyètes. À défaut, on pourra aussi affecter des coefficients égaux pour tous les pluviomètres (i.e:  $w_i = 1/(\text{nombre de pluviomètres})$ ). Les méthodes utilisées pour calculer le coefficient de pondération sont :

#### *α*. Moyenne arithmétique

Cette méthode permet de calculer un coefficient égal à l'inverse du nombre de stations. C'est le même coefficient qui sera appliqué à l'ensemble des stations de mesure se trouvant sur le bassin versant (ou à proximité).

$$w_i = \frac{1}{N} \quad (\text{III- 30})$$

avec,  $N$  : Nombre de stations pluviométriques.

#### *β*. Polygones de Thiessen

Cette méthode permet de déterminer le coefficient de pondération en utilisant les polygones de Thiessen (figure III.5.a). Le coefficient de pondération est calculé par la formule ci-dessous :

$$w_j = \frac{a_{ij}}{A_i} \quad (\text{III-31})$$

avec,  $a_{ij}$  : Surface d'intersection du « polygone  $j$  » et le « sous bassin  $i$  » ;  $A_i$  : Surface totale du sous bassin  $i$ .

#### *χ*. Les isohyètes



Les isohyètes sont des lignes de même pluviosité (isovaleurs de pluies annuelles, journalières, etc.) (Figure III.5.b). Les coefficients de pondération peuvent être calculés de la manière suivante :

$$w_j = \frac{b_{ij}}{A_i} \quad (\text{III-32})$$

avec,  $b_{ij}$  : Surface délimitée par le sous-bassin  $i$  et les deux isohyètes  $j$  et  $j+1$  ;  $A_i$  : Surface totale du sous-bassin  $i$ .

La pluie moyenne sur le sous-bassin  $i$  est calculée par la suite en utilisant la formule suivante :

$$P_{\text{moy}} = \sum_{j=1}^k w_j P_j, \quad \text{avec, } P_j = \frac{h_j + h_{j+1}}{2} \quad (\text{III-33})$$

avec,  $P_j$  : Précipitation moyenne entre deux isohyètes  $j$  et  $j+1$  et  $k$  : nombre total d'isohyètes.

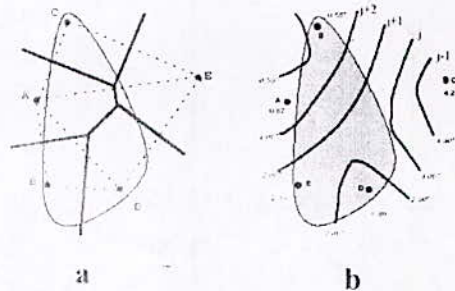


Figure III.5 : Illustration de la méthode des polygones de Thiessen et la méthode des isohyètes

### ii. Répartition temporelle

Une fois la moyenne totale des précipitations est calculée, il faut ensuite donner la répartition temporelle des précipitations à partir de la répartition typique de l'évènement pluvieux  $P_{\text{typ}}(t)$ :

$$P_{\text{moy}}(t) = \left[ \frac{P_{\text{typ}}(t)}{\sum_t P_{\text{typ}}(t)} \right] P_{\text{moy}} \quad \text{où :} \quad P_{\text{typ}}(t) = \frac{\sum_j w_j P_j(t)}{\sum_j w_j} \quad (\text{III-34})$$

avec,  $w_j$  : coefficients de pondération affectés au pluviomètre  $j$ .

### b. Inverse du carré de la distance

C'est une autre alternative à la méthode précédente qui comprend en fait deux étapes (calcul de  $P_{\text{moy}}$  puis la répartition temporelle). Cette méthode permet la réalisation directe de l'hyétographe en faisant intervenir la notion de nœuds entre pluviomètres. Les nœuds sont positionnés sur le bassin versant de sorte à avoir une répartition spatiale adéquate de la précipitation. Le HEC-HMS définit alors la répartition temporelle des pluies en un nœud par pondération des données pluviométriques donnée par la relation suivante :

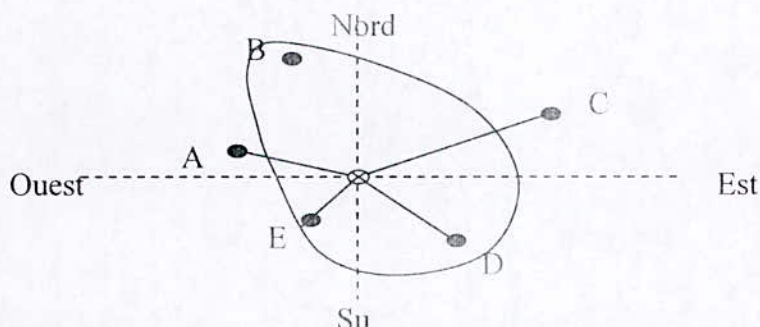
$$P_{\text{nœud}}(t) = \sum_i w_i P_i(t) \quad (\text{III-35})$$

où :  $w_i$  est le coefficient de pondération affecté à la station  $i$  ( $i=1..n$  nbr de stations)

Pour calculer les coefficients de pondération, le HEC-HMS construit un repère orthogonal basé sur un nœud (figure III.6), puis il détermine pour chaque quadrangle délimité par deux axes une station (la plus proche du nœud). Le facteur de pondération est calculé par la relation suivante :

$$w_j = \frac{1/d_j^2}{\sum 1/d_j^2} \quad (\text{III-36})$$

où,  $1/d_j^2$  : Inverse du carré de la distance de la station  $j$  au « nœud P ».



**Figure III.6 :** Illustration de la méthode de l'inverse du carré de la distance

Une fois la série  $P_{\text{node}}(t)$  est établie pour tous les nœuds, la moyenne temporelle des précipitations est calculée par la relation suivante :

$$P_{\text{moy}}(t) = \frac{\sum w_{\text{node}}(t) P_{\text{node}}(t)}{\sum w_{\text{node}}} \quad (\text{III-37})$$

où :  $w_{\text{node}}$  est le poids affecté pour chaque nœud. Si un seul nœud est utilisé dans le bassin versant,  $w_{\text{node}}$  sera égale à 1.00. Sinon, on détermine  $w_{\text{node}}$  pour chaque nœud en utilisant les polygones de Thiessen ou un autre schéma.

### c. Evènements pluvieux hypothétiques

On peut créer avec le logiciel HEC-HMS des évènements pluvieux (ou plus simplement : pluies) hypothétiques, c'est à dire réaliser une simulation à partir de données qui ne sont pas issues de relevés réels. Cela peut s'avérer utile en particulier lorsqu'on veut connaître les volumes d'écoulements pour dimensionner des ouvrages d'art.

On peut créer trois types d'évènements pluvieux standards :

- Pluie hypothétique basée sur la fréquence ;
- Pluie de projet standard : cette méthode fait intervenir des paramètres définis uniquement pour le territoire américain par certains organismes ;
- Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur.

#### *i. Pluie hypothétique basée sur la fréquence*

L'objectif de cette méthode est de définir un évènement pour lequel la hauteur et la durée des précipitations sont déterminées pour une probabilité de dépassement donnée. Pour définir cet évènement avec HEC-HMS l'utilisateur doit spécifier la hauteur de précipitation en chaque pas de temps pour une probabilité de dépassement choisi. Les hauteurs des précipitations peuvent être déduites à partir des courbes HDF (Hauteur

Durée Fréquence). HEC-HMS applique un coefficient de correction de surface aux hauteurs données par les courbes HDF. Généralement, la distribution de l'intensité des précipitations est non uniforme sur le bassin versant, la hauteur moyenne sur la surface du bassin est inférieure à la hauteur donnée par les courbes HDF. Pour palier à ce problème, le U.S. Weather Bureau, a défini des facteurs qui permettent d'ajuster les hauteurs données par les courbes HDF à la hauteur moyenne. Ces facteurs, exprimés en pourcentage, sont fonction de la surface du bassin et de la durée de la pluie (figure III.7)

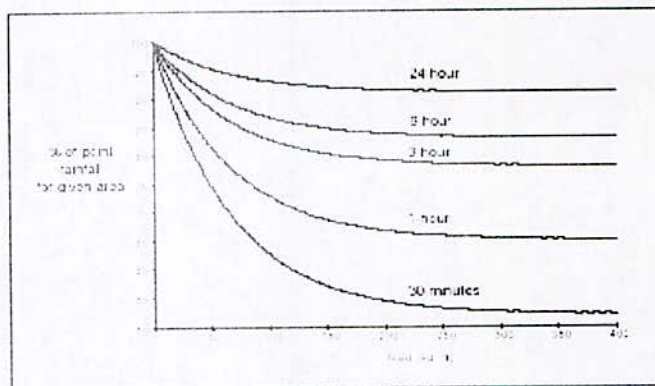


Figure III.7 : Facteurs de réduction des hauteurs données par les courbes HDF

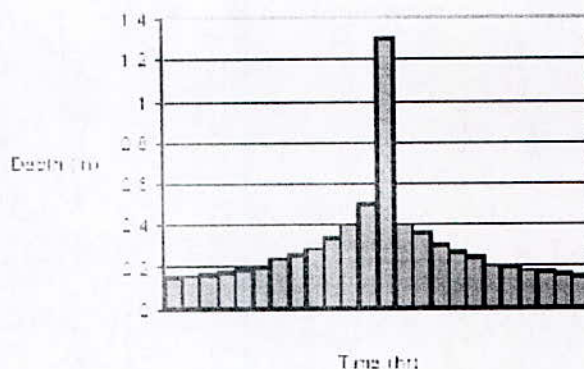
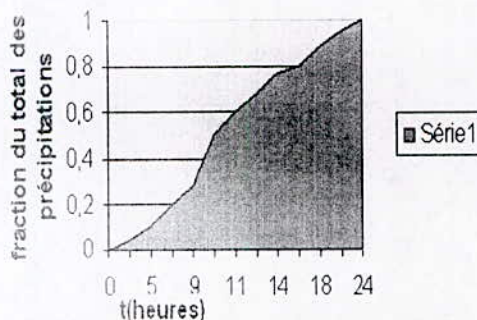


Figure III.8 : Exemple de la distribution de la Pluie basée sur la fréquence.

### ii. Pluie hypothétique dont la distribution est définie par l'utilisateur

Cette méthode permet à l'utilisateur de définir la hauteur et la distribution de la pluie hypothétique. On peut aussi donner la quantité totale d'eau tombée sur le bassin versant et la fraction de cette quantité à chaque instant, avec une courbe du type.

Figure III.9 : Répartition de la précipitation au cours de l'évènement



Il est important de définir un évènement pluvieux hypothétique d'une durée suffisamment longue pour que tout le bassin versant participe à l'écoulement. A titre indicatif un temps total égal à 3 fois le temps de concentration du bassin versant donne de bons résultats [Lemieux, (2001)].

## II.2 Modélisation de l'Evapotranspiration (ETP)

Comme l'ETP reste insignifiante pendant l'inondation, le HEC-HMS ne tient pas compte de tous les détails concernant cette entité. Dans le cas des orages plus courts, telle que la pluie de projet standard, il est approprié d'omettre cette entité. Cependant, avec le modèle SMA, qui est décrit en détail dans la section Modélisation de pertes, il est possible d'analyser la réponse du bassin versant à des séries de précipitations de longue durée qui incluent les périodes de précipitation et les périodes sans précipitations. Pendant les périodes sans précipitations, l'état d'humidité du bassin versant continue à changer. L'évapotranspiration est la composante critique de ce mouvement. L'évapotranspiration, comme modelée dans HEC-HMS, inclut la vaporisation de l'eau directement du sol et la transpiration des végétaux.

Dans HEC-HMS on représente l'Evapotranspiration par des valeurs et des coefficients de correction en pas de temps mensuel. Le taux d'évapotranspiration mensuel est calculé ensuite par le produit des valeurs de l'ETP par ces coefficients [Henine, (2005)].

## III. SPECIFICATION DE CONTROLE

Les spécifications de contrôle sont la dernière composante indispensable pour effectuer une simulation. C'est à cette étape que l'on définit les instants de départ et de fin de la simulation ainsi que le pas de temps de calcul.

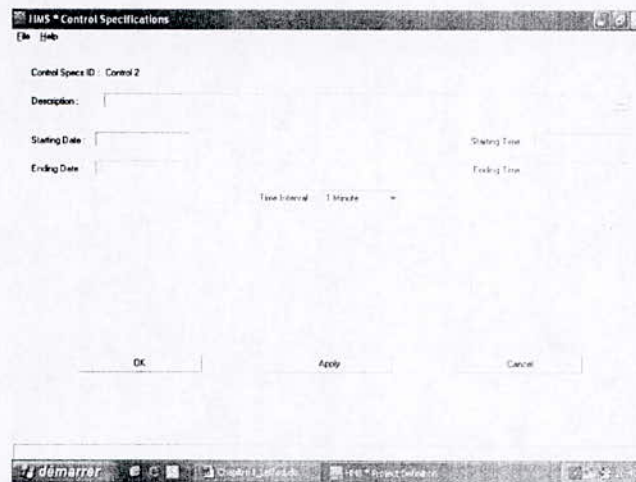


Figure III.10 : Fenêtre principale des spécifications de contrôles

### a. Dates et temps

Le logiciel est assez flexible quant à la manière de rentrer les dates. Nous conseillons toutefois de les rentrer de la façon suivante: 09 Jun 2000 .

### b. Les pas de temps

Les pas de temps peuvent varier entre 1 minute et 24 heures. HEC-HMS réalise une interpolation linéaire pour obtenir les valeurs correspondant à un multiple entier du pas de temps dans les données hydrométéorologiques.

#### IV. REALISATION DE LA SIMULATION ET VISUALISATION DES RESULTATS

##### ➤ Créer et gérer une exécution

L'outil principal est le gestionnaire d'exécution que l'on obtient à partir de l'écran Basin Model: Simulate/Run Manager. L'exécution est lancée après avoir sélectionné un "Run" dans la colonne Run ID, puis en appuyant sur Compute.

##### ➤ Configuration et options de la simulation

Il est nécessaire de définir les composantes et certaines options de la simulation dans la fenêtre prévue à cet effet, accessible à partir du gestionnaire (Run Manager) en faisant: Edit / Run Options.

Cette option peut être utilisée pour entrer un ratio de précipitation ou de débit. En effet on peut ajuster un hyetographe avant de lancer le calcul des pertes fluviales en le multipliant par un ratio des précipitations. De même on peut ajuster, à l'aide d'un ratio de débit, un hydrographe avant de lancer une simulation de ruissellement.

##### ➤ Visualisation des résultats

Les résultats de la visualisation peuvent être visualisés sous trois formes différentes à partir du menu View Results :

- un graphe (graph): disponible pour chaque élément constituant le bassin versant;
- un tableau récapitulatif des résultats (Summary table) : permet d'obtenir des informations relatives aux pics d'intensité et aux volumes écoulés pour chaque élément du bassin versant;
- un tableau relatif aux résultats calculés à chaque pas de temps (Time Series Table).

#### V. LE CALAGE DU MODELE

Nous allons expliquer ici comment caler les modèles hydrologiques utilisés lors de l'exécution du logiciel HEC-HMS.

On se sert pour cela d'un hydrographe observé et le logiciel HEC-HMS compare cet hydrographe à celui qu'il a calculé.

Ce calage du modèle s'effectue à partir de l'écran du gestionnaire de l'optimisation (Optimisation Manager) et s'effectue en trois étapes:

- Créer une simulation d'optimisation en choisissant un modèle de bassin, un modèle météorologique et des spécifications de contrôle ;
  - Créer et configurer le premier essai de calage en choisissant l'endroit où va se faire l'optimisation, la fonction mathématique qui va calculer l'écart entre les hydrographes observés et calculés, .... ;
  - Caler le modèle.
- Création d'un calage du modèle

Comme on l'a vu, on crée un calcul d'optimisation en cliquant sur Simulate-Optimization Run Configuration et en choisissant les différents modèles utilisés. Puis on lance les essais de calage en sélectionnant le bouton New Trial

✓ **Résultats des essais**

Afin de visualiser les résultats concernant les différentes tentatives d'optimisation plusieurs alternatives sont disponibles :

- Résultats de chaque essai (Trial Results): permet de visualiser les paramètres symbolisant les écarts entre les hydrographes observés et calculés (Volume écoulé, pic d'intensité, ...)
- Graphe de comparaison (Flow Comparison Graph): permet de comparer les deux hydrographes visuellement;
- Graphique de dispersion (Scatter Graph): permet de visualiser le rapport hydrographe observé/hydrographe calculé par rapport à une droite d'angle 45°.
- graphique des résidus (Residual Graph): permet de visualiser le débit résiduel pour chaque pas de temps;
- Objective Function Graph : montre la valeur de la fonction servant à l'approximation de l'écart hydrographe observé calculé à chaque pas de temps;

Schéma d'optimisation (Optimization Schematic): permet de visualiser des résultats pour n'importe quel élément placé en amont du point où l'on procède

**CONCLUSION**

L'utilisation d'un modèle hydrologique demande certains paramètres comme le HEC-HMS, nous avons recueillis toutes les données dont on a besoin afin de l'appliquer sur un bassin versant algérien qui sera présenté dans le dernier chapitre.

## Chapitre IV : Schématisation du modèle de bassin avec HEC-GeoHMS

**Introduction**

Avant de procéder à l'application du HEC-HMS, une schématisation du bassin versant est nécessaire. Cette schématisation correspond aux différentes étapes que nous devons réaliser comme la détermination des sous bassins, le cours d'eau principal,..... etc.

Pour cela il faudrait d'abord élaborer un MNT (modèle numérique de terrain) du bassin versant d'étude ensuite le schématiser.

Dans ce projet, nous avons obtenus cet MNT, qui a été élaboré par un Ingénieur de l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) avec deux cartes topographique à l'échelle 1/50000. Cet MNT correspond juste à la moitié du bassin versant de Sidi Bel Abbes c'est-à-dire, il comprend juste la partie de Sidi Bel Abbes jusqu'à Sidi Ali Benyoub traversant l'Oued Mekerra.

**I. Création du modèle du bassin**

Le logiciel HEC-GeoHMS est nécessaire pour la création du modèle de bassin. C'est une extension du système d'information géographique Arcview et du Spatial Analyst et qui a été développé comme un outil hydrologique géospatial pour les ingénieurs et hydrologues. Ce logiciel produit un certain nombre d'inputs hydrologiques qui sont directement employées par HEC-HMS. Il assiste l'utilisateur pour l'évaluation des paramètres hydrologiques en fournissant des tables des caractéristiques physiques des cours d'eau et des lignes de partage. Il permet en outre aux utilisateurs de visualiser l'information spatiale, les caractéristiques de ligne de partage, d'exécuter le « Spatial Analyst », de délimiter les bassins et les ruisseaux et de construire les inputs aux modèles hydrologiques.

Une première étape consiste à télécharger le logiciel HEC-GeoHMS sous Arcview et le faire apparaître dans ses extensions, le Spatial Analyst est automatiquement chargé sous Arcview.

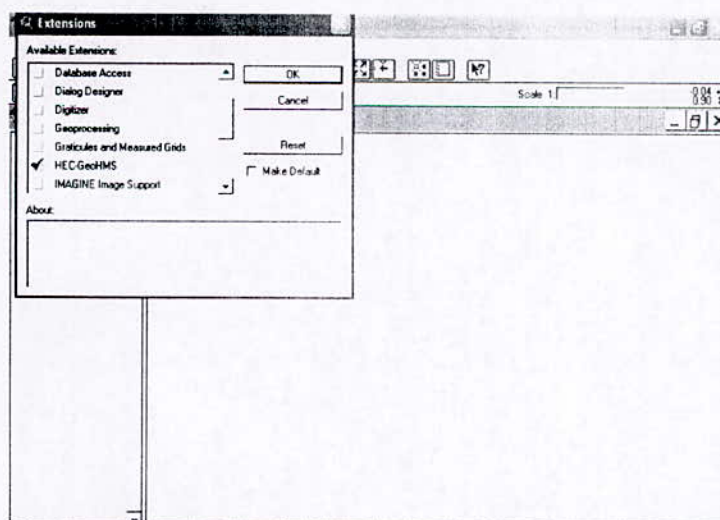


Figure IV.1 : Téléchargement de HEC-GeoHms dans les extensions de Arcview.

## II. Procédure de schématisation du bassin

Après cette procédure, de nouvelles barres d'outils propres à HEC-GeoHMS chargées sous Arcview apparaissent. L'étape suivante consiste en la réalisation d'un ensemble d'opérations permettant d'avoir vers la fin une schématisation de notre modèle de bassin, ces opérations sont :

- a- Pré-traitement du terrain : Il consiste en le chargement du Modèle Numérique du Terrain illustré dans la figureIV.2.



Figure IV.2 : Le MNT de Sidi Bel Abbas sous Arcview.

- b- Lors de la réalisation du MNT plusieurs erreurs ont été commises et qui sont dues essentiellement aux prélèvements et aux interpolations effectués, dans cette étape on procède à une correction du MNT par le remplissage des dépressions en augmentant l'altitude des cellules au niveau du terrain environnant afin de déterminer le sens d'écoulement. Cette opération permettra à l'eau de couler à travers le paysage, le résultat de cette étape est illustré dans la figureIV.3.

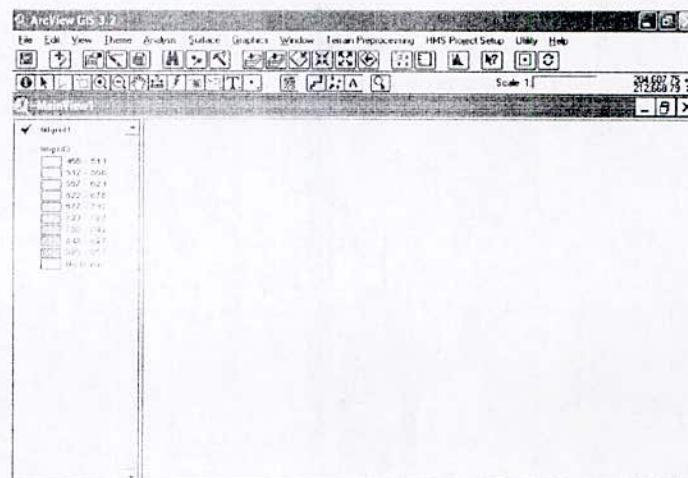


Figure IV.3 : MNT corrigé.



- c- Sens d'écoulement (Flow direction) : cette étape définit la direction de chaque cellule du terrain suivant les huit directions possibles (nord-sud-est-ouest-nord-est-nord-ouest-sud-est et sud-ouest), telle que :
- Le bleu correspond à l'Est ;
  - Le vert correspond Sud-est ;
  - Le rouge correspond Nord-est ;
  - Le jaune correspond au Sud.

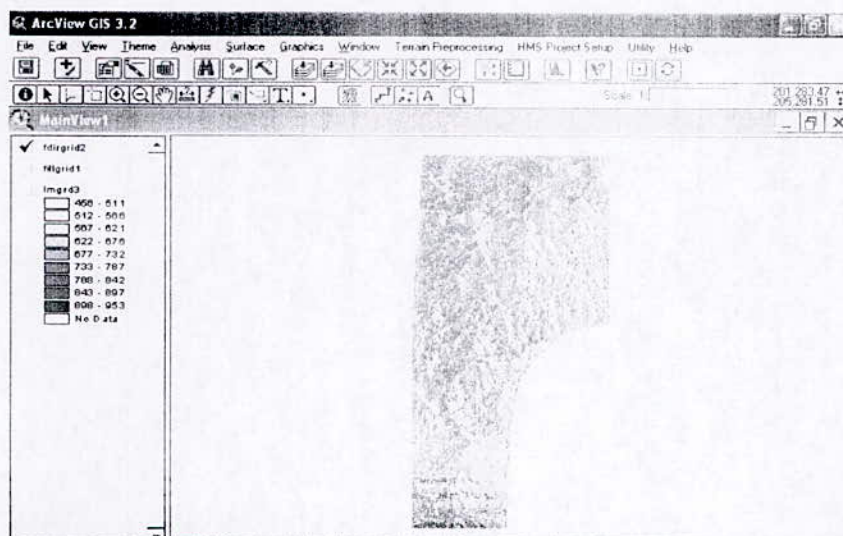


Figure IV.4 : Direction de l'écoulement.

- d- Accumulation de l'écoulement (Flow accumulation): cette étape détermine le nombre de cellules ascendantes (amont) s'écoulant à une cellule donnée (figure IV.5).

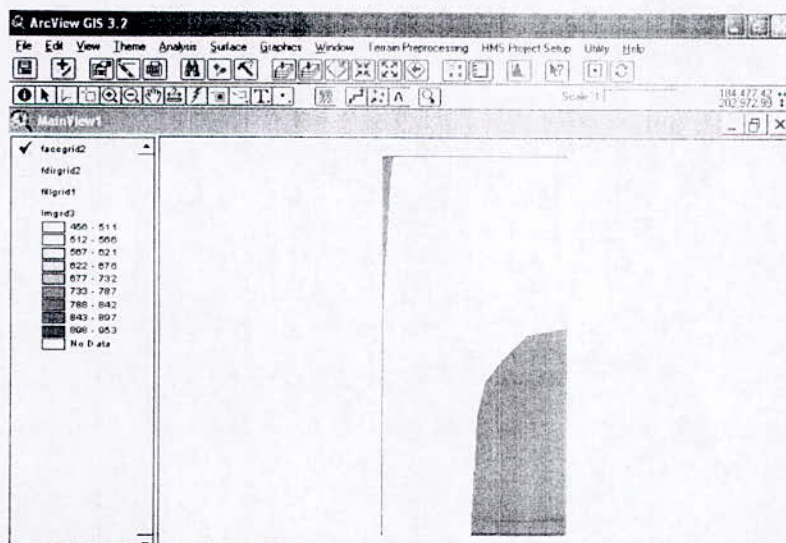


Figure IV.5 : L'accumulation de l'écoulement.

- e- Définition des cours d'eau (Stream definition): cette étape classe toutes les cellules dont l'accumulation d'écoulement est plus grande qu'un seuil défini par l'utilisateur. Le seuil personnalisé par l'utilisateur doit représenter une surface (c'est la surface du plus grand sous bassin qu'on veut avoir) en distance au carré, le résultat de cette classification est illustré dans la figure IV.6.

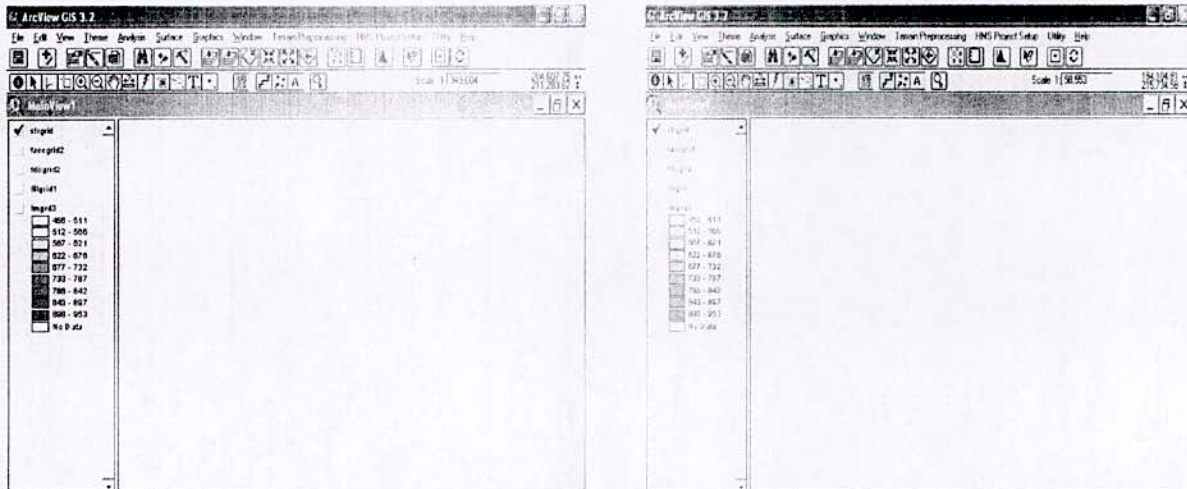


Figure IV.6 : Définition des cours d'eau.

- f- Segmentation des cours d'eau : cette étape divise les cours d'eau en des segments. Les segments ou les liens de cours d'eau sont les sections d'un cours d'eau qui relient deux jonctions successives ou une jonction et une sortie (figure IV.7).

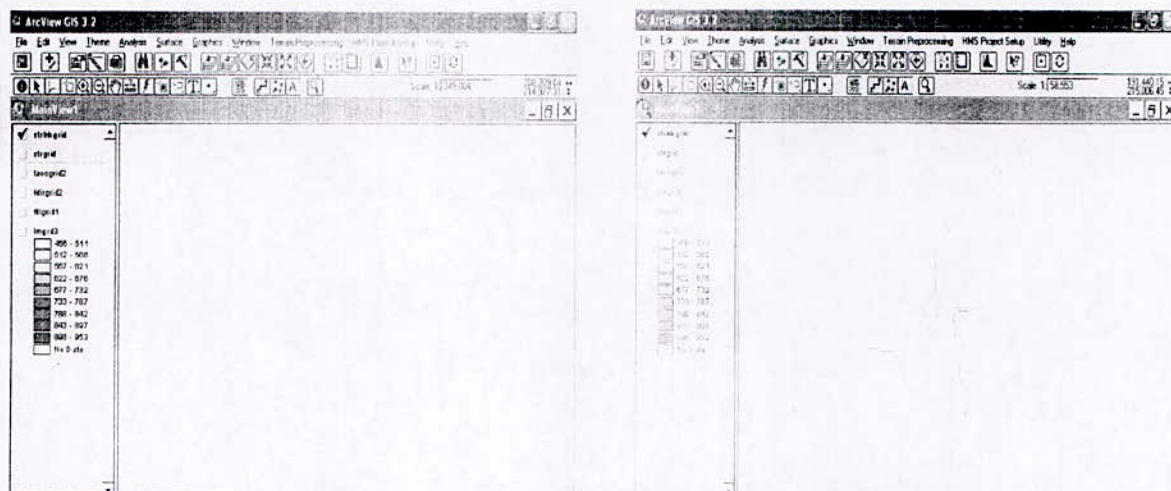


Figure IV.7 : Cours d'eau segmentés en grille.

- g- Délimitation de ligne de partage : cette étape trace les limites des sous bassins ou les lignes de partage pour chaque segment du cours d'eau.

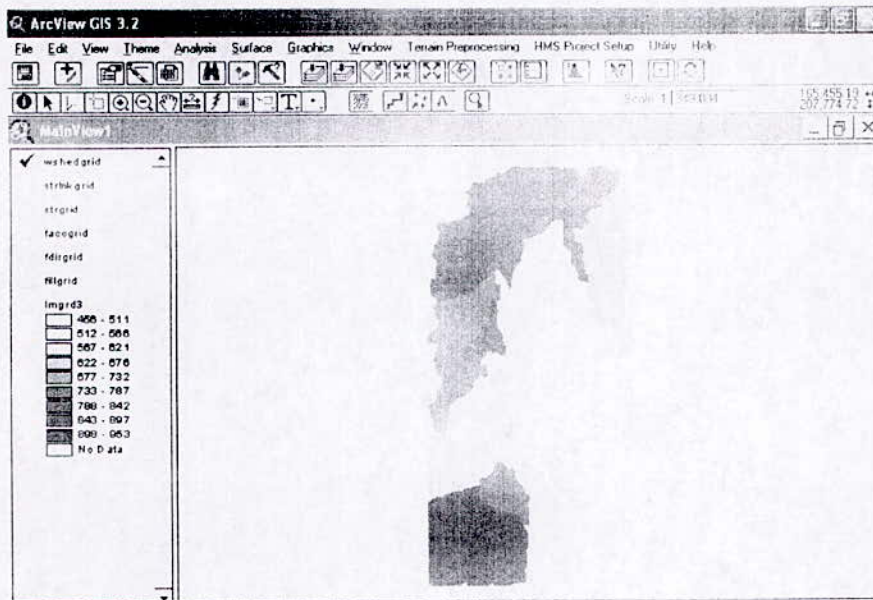


Figure IV.8 : Délimitation des lignes de partages.

h- Polygones des lignes de partage : cette étape convertit la représentation en grille des sous bassins en représentation vectorielle (figure IV.9).

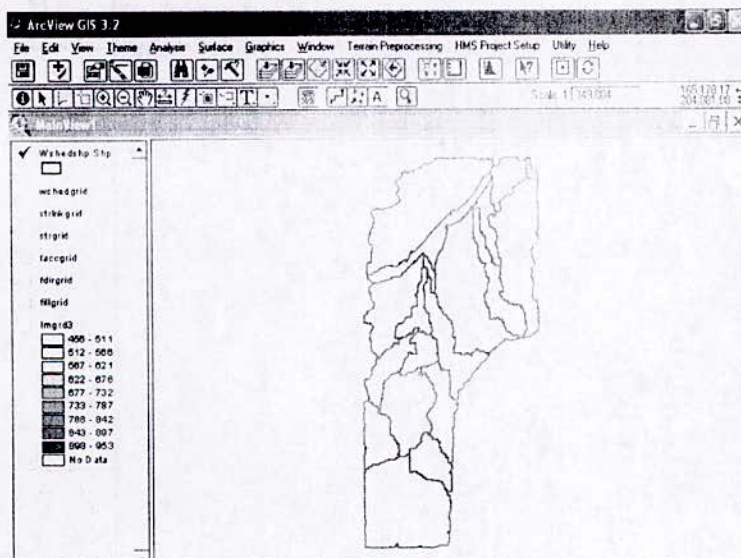


Figure IV.9 : Polygone des lignes de partage.

i- Traitement des segments du cours d'eau : Cette étape convertit des ruisseaux de la représentation en grille en représentation vectorielle (figure IV.10).

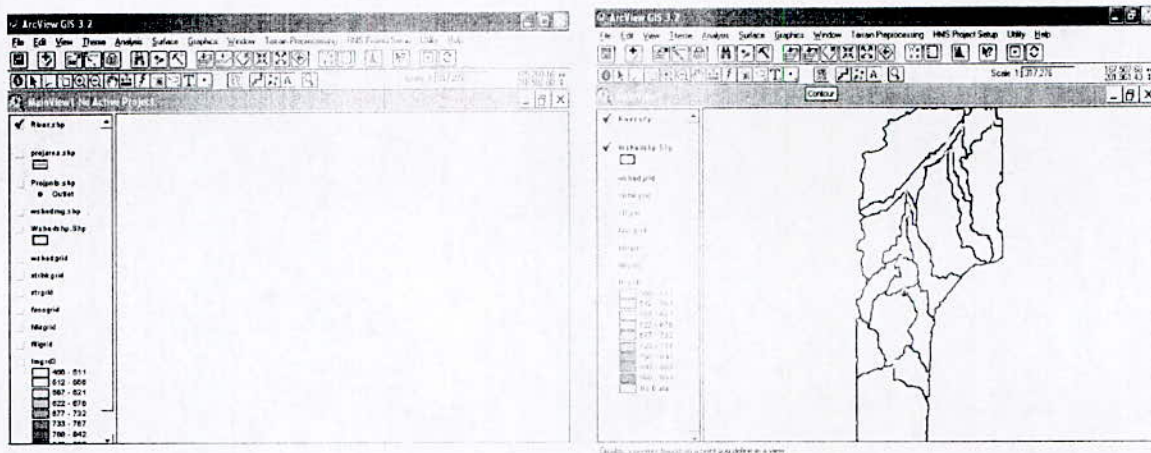


Figure IV.10 : Représentation vectorielle des cours d'eau.

j- Agrégation des lignes de partage (Watershed aggregation) : cette étape agrège les sous bassins à chaque confluence du ruisseaux. C'est une étape exigée et elle est exécutée pour tracer inter activement les sous bassins et relever les données extraites des étapes précédentes ; cette étape n'a aucune signification hydrologique.

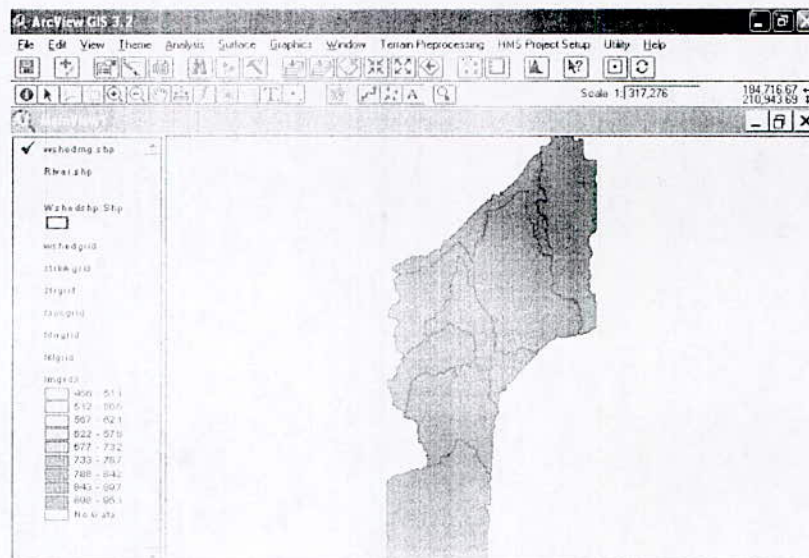


Figure IV.11 : Agrégation des lignes de partage.

### III. Établissement des éléments hydrologique du bassin

Ce menu réalisé sur la vue principale (Mainview) est responsable de l'extraction des informations nécessaires à partir de la base de données spatiale et de la création d'un projet de HMS, Cette étape consiste à :

- Déterminer l'exutoire ;
- Lancer un nouveau projet « New Project » ;
- Lancer de nouvelles fenêtres concernant l'HMS.

**a) Représentation de l'exutoire**

Cette étape consiste à poser le point sur le cours d'eau principale, ainsi on déterminera notre bassin d'étude.

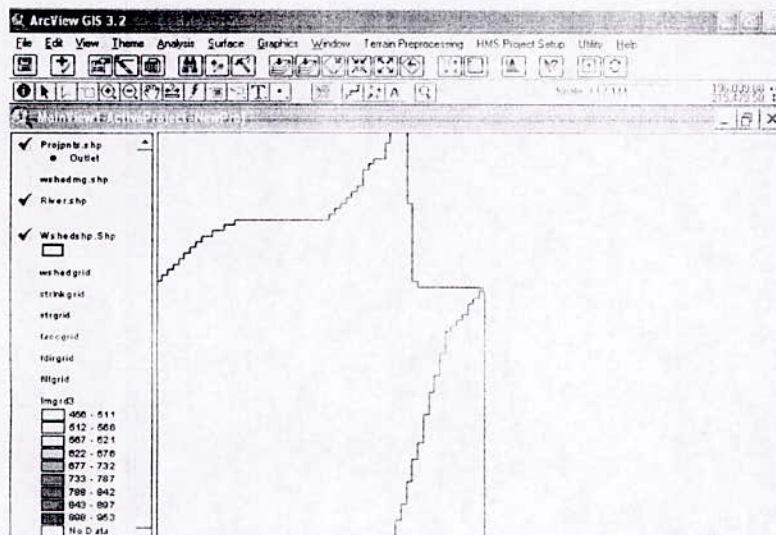


Figure IV.12 : Représentation de l'exutoire.

**b) Lancer un nouveau projet**

Permet de définir un nouveau projet et créer un annuaire qui va contenir toutes les données extraites et les fichiers créés.

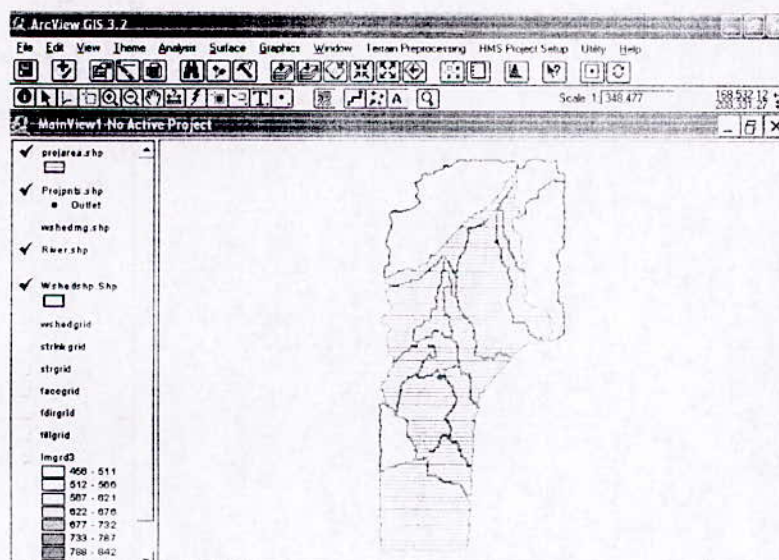


Figure IV.13 : Lancement d'un nouveau projet.

**c) Générer la vue de projet**

Permet de générer une vue de projet (Project-view), après que l'utilisateur aurait défini la zone d'étude donnant l'exutoire du bassin (figure IV.14).

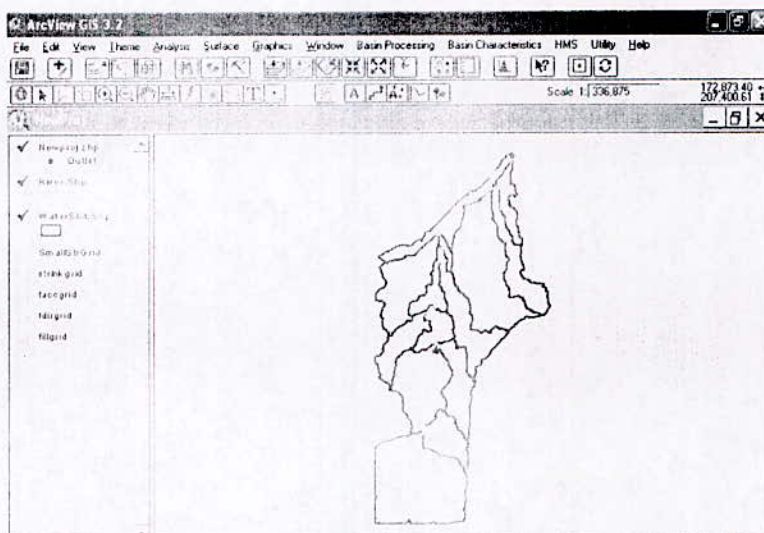


Figure IV.14 : Génération du nouveau projet.

**d) Traitement des sous bassins**

Après que le pré-traitement du terrain est exécuté dans la vue principale, les données extraites de la vue principale pour le modèle HMS sont produites et placées dans la vue de projet, ce qui permettra à l'utilisateur de mettre à jour les délimitations des sous bassins. Cette étape offre les possibilités de fusion de bassins, de subdivision de bassins, de fusion de cours d'eau et d'obtention de profils en long des cours d'eau.

Notre bassin a été subdiviser en trois sous bassin principaux : celui de Sidi Bel Abbes, Sidi Ali Benyoub et un autre qui se situe entre les deux.

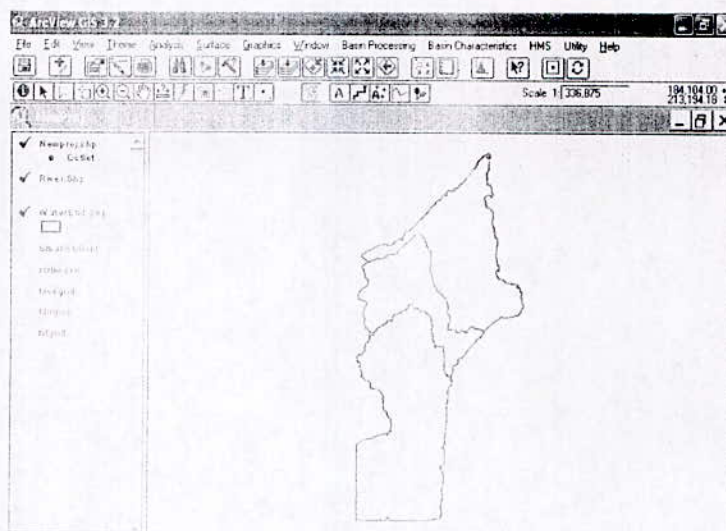


Figure IV.15 : Traitement des sous bassins.

Après que le traitement des sous bassins est effectué, on retrouve les caractéristiques de ces sous bassins dans la fenêtre « Attribute Table », telle que cette table représente : la surface de chaque sous bassin, le périmètre, la pente, l'altitude,.....etc.

Shape	Id	Gridcode	Area	Wshld	TopoDane	Perimeter	Elevation	DSElv	Slp_EndPt	Slp_1005	Long
Polygon	1	2	53626.76680	2	0	3834.740400	479.0000	479.0000	0.001	0.001	
Polygon	3	4	95918806.50	4	0	83367.68960	524.0000	479.0000	0.011	0.009	
Polygon	8	9	58678713.32	9	0	68072.05840	579.0000	519.0000	0.009	0.008	1
Polygon	11	13	142393147.1	13	0	78471.35440	690.0000	571.0000	0.012	0.008	

Figure IV.16 : Caractéristique des sous bassins.

e) Centroïde du bassin

À cette étape, on détermine le centre de gravité de chaque sous bassin. Le résultat du calcul du centre de gravité de l'ensemble des sous bassins est illustré dans la figure IV.16.

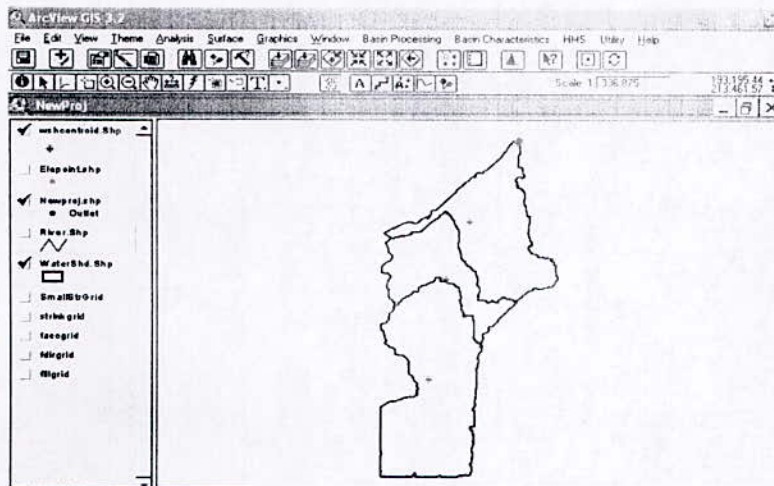


Figure IV.17 : les centroïdes de chaque sous bassin.

On retrouve les caractéristiques de ces centroïdes dans la table suivante :

Shape	Wshld	Elevation
Point	2	479.0000
Point	4	510.0000
Point	10	580.0000
Point	7	550.0000
Point	9	560.0000
Point	13	690.0000
Point	14	520.0000

Figure IV.18 : Caractéristique des centroïdes.

**f) La longueur du plus long chemin d'écoulement (cours d'eau principal)**

Cette opération permet de calculer un certain nombre de caractéristiques physiques du bassin à savoir la longueur du cours d'eau principal, altitudes, pente entre les extrémités du cours d'eau....

Shape	Wshld	DSElv	Stp_EndPt	Stp_1005	LongestFL	LUSElv
PolyLine	2	479.0000			0.000	479.0000
PolyLine	4	479.0000	0.005	0.005	18585.962	571.0000
PolyLine	10	519.0000	0.009	0.008	16355.567	660.0000
PolyLine	7	489.0000	0.013	0.010	18274.213	722.0000
PolyLine	9	519.0000	0.008	0.007	14114.044	630.0000
PolyLine	13	571.0000	0.012	0.008	28392.545	924.0000
PolyLine	14	520.0000	0.000	0.000	21.665	520.0000

Figure IV.19 : Caractéristique de la longueur du cours d'eau.

**g) Centre du cours d'eau principal**

Ce centre est calculé par la projection du centre de gravité d'un bassin sur le courant principal du même bassin. Le centre du courant principal est alors mesuré depuis le point projeté sur le cours d'eau principal jusqu'à l'exutoire du bassin approprié (figure IV.17).

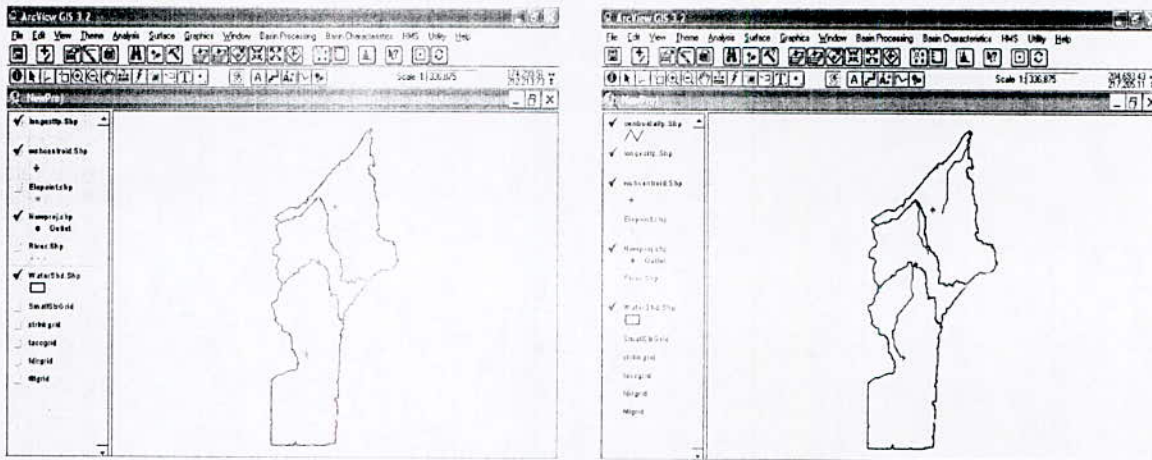


Figure IV.20 : Représentation vecteur des cours d'eau principaux de chaque sous bassin.

**h) Contrôle des données de HMS**

Cette étape examine toutes les données pour s'assurer de l'uniformité de la description de la structure hydrologique du modèle. Par exemple, le programme vérifie si les noms des biefs, des sous bassins et de l'exutoire sont uniques. En outre, le programme vérifie que les cours d'eau et les centres des bassins sont contenus dans les sous bassins et que les cours d'eau sont reliés aux points appropriés.



i) Légende de HMS

Ce processus met en application des signes conventionnels de HMS pour représenter d'une manière plus descriptive les points et les lignes en éléments hydrologiques, tels que les jonctions, les sous bassins, les biefs, et d'autres (figures IV.18).

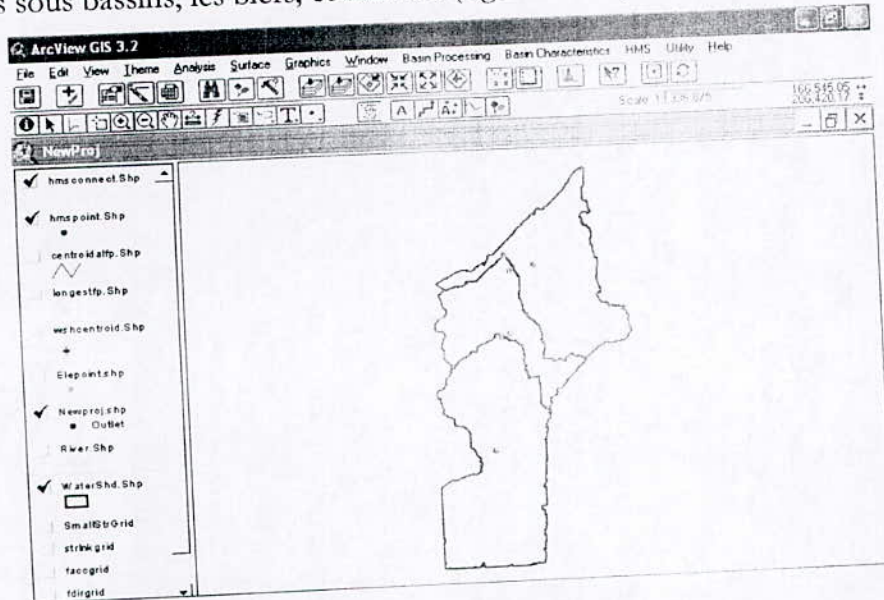


Figure IV.21 : Conversion sous HMS.

Shape	NumId	Dstr_Name	Name	Type	FromCanvasX	FromCanvasY	CanvasX	CanvasY
PolyLine	2	Outlet	R20w20	1	195907.571	215471.247	195912.987	215476.663
PolyLine	4	JR20	R50w40	1	195187.203	210721.151	195907.571	215471.247
PolyLine	10	JR40	R100w100	1	190832.498	201632.600	188963.874	208397.559
PolyLine	7	JR50	R80w70	1	194748.483	205776.070	194618.492	212524.779
PolyLine	9	JR40	R90w90	1	186039.072	203582.468	188963.874	208397.559
PolyLine	13	JR120	R130w130	1	187712.709	191477.038	188584.733	201551.356
PolyLine	14	UserPoint2	R200w140	1	188920.544	208278.400	188920.544	208289.233
PolyLine	2	Outlet	R20	2	195907.571	215471.247	195912.987	215476.663
PolyLine	5	JR20	R50	2	194618.492	212524.779	195907.571	215471.247
PolyLine	4	JR20	R40	2	188963.874	208397.559	195907.571	215471.247
PolyLine	10	JR40	R100	2	189343.015	207054.316	188963.874	208397.559
PolyLine	12	JR100	R120	2	188584.733	201551.356	189343.015	207054.316
PolyLine	22	Outlet-16	R220	2	188920.544	208289.233	188909.711	208343.396

Figure IV.22 : Caractéristique des éléments de HMS.

j) Schématisation HMS

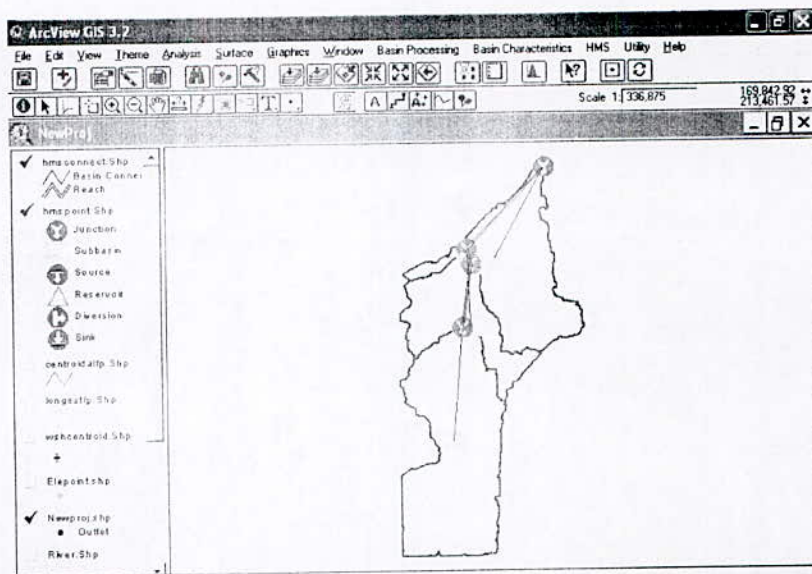


Figure IV.23 : Schématisation du modèle de bassin de Sidi Bel Abbas.

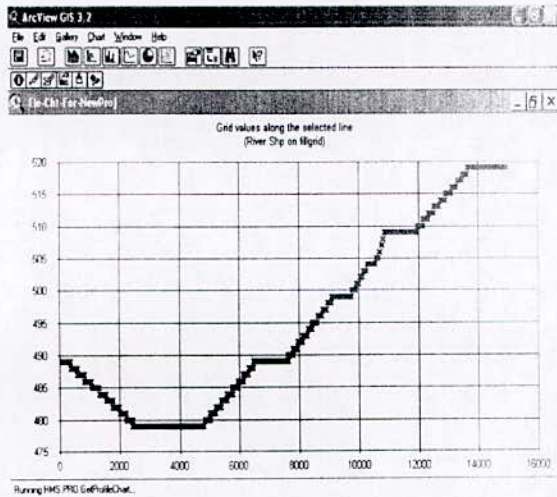
On retrouve tous les caractéristiques des éléments HMS dans la table attribue, qui est représenté ci-dessous :

Shape	Numid	Distr_Name	Name	Type	Canvas'x	Canvas'y	Elevation
Point	1		Outlet	0	195912.987	215476.663	479.000
Point	2	Outlet	R20w20	8	195907.571	215471.247	479.000
Point	3	R20	JR20	7	195907.571	215471.247	479.000
Point	4	JR20	R50w40	8	191384.961	207455.123	524.000
Point	5	R40	JR40	7	188963.874	208397.559	519.000
Point	9	JR40	R100w90	8	189310.518	201632.600	579.000
Point	10	R120	JR120	7	188584.733	201551.356	571.000
Point	13	JR120	R130w130	8	187712.709	191477.038	690.000
Point	14	R100	JR100	7	189343.015	207054.316	529.000

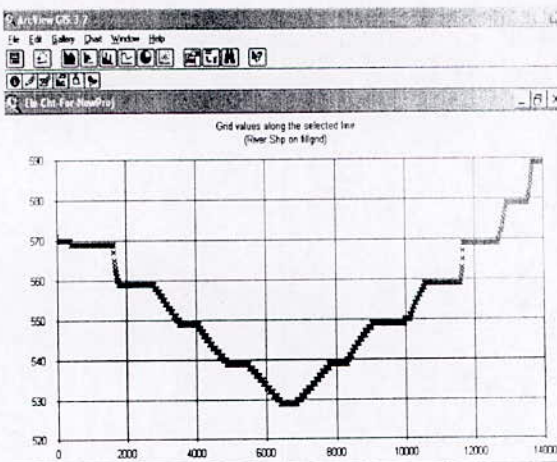
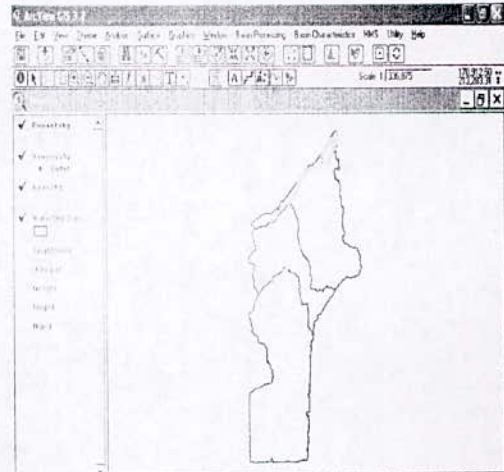
Figure IV.24 : Caractéristique des éléments HMS.

**k) Caractéristique des cours d'eau**

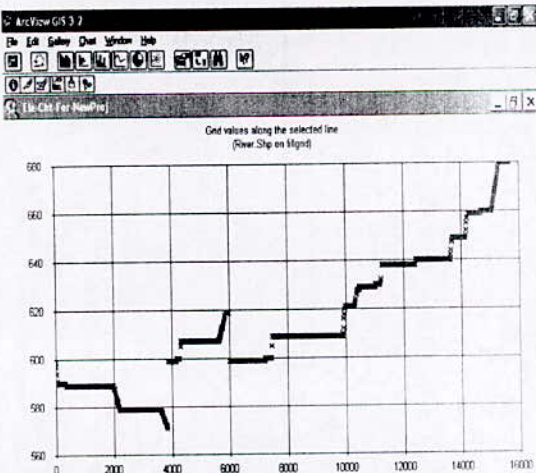
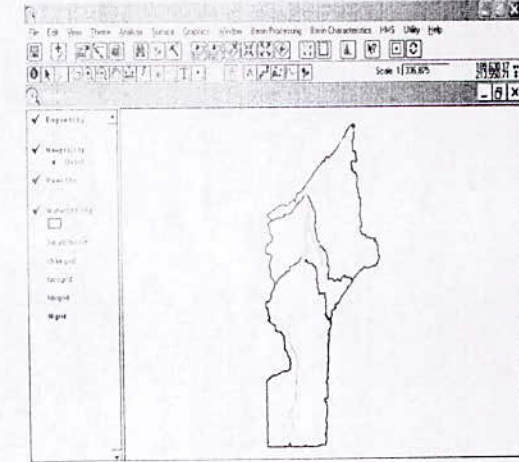
En choisissant deux segments de cours d'eau qui sont adjacents, on obtient le profil en long de chaque segment.



Running HMS PRO GeoPublicChart...



Running HMS PRO GeoPublicChart...



Running HMS PRO GeoPublicChart...



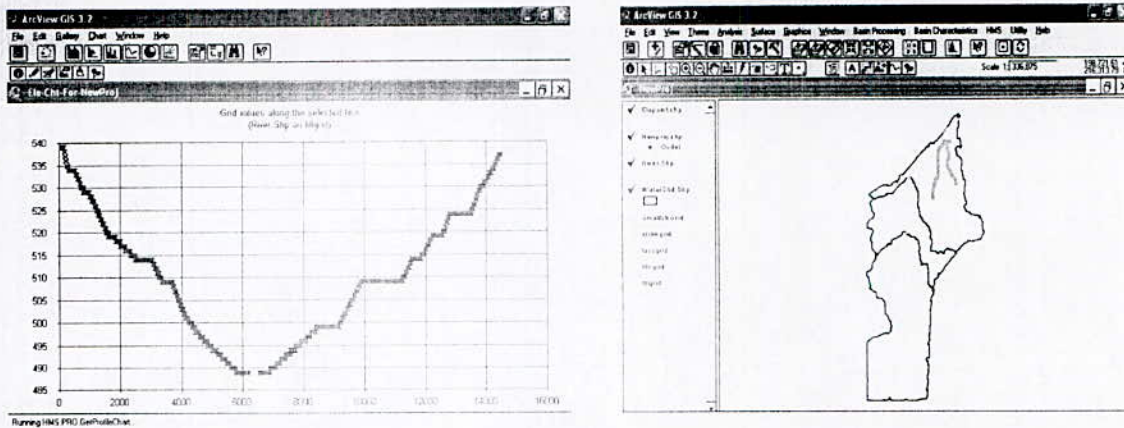


Figure IV.25 : le profil en long des segments.

1) La table des coordonnées des rivières

Shape	Acord	Grid coord	From node	To node	Wshld	Rivrd	Length	Riv_Length	Slp_Endpt	us_Elv	ds_Elv
PolyLine	1	2	1	2	2	2	8	7.7	0.0000	479.0000	479.0
PolyLine	2	5	3	1	4	5	3498	3498.4	0.0029	489.0000	479.0
PolyLine	3	4	4	1	4	4	11442	11442.2	0.0035	519.0000	479.0
PolyLine	4	8	5	3	7	8	6192	6191.6	0.0081	539.0000	489.0
PolyLine	5	10	6	4	10	10	1572	1572.1	0.0064	529.0000	519.0
PolyLine	6	7	7	3	7	7	8290	8290.1	0.0059	538.0000	489.0
PolyLine	7	9	8	4	9	9	77	76.6	0.0000	519.0000	519.0
PolyLine	8	12	9	6	10	12	6636	6636.4	0.0063	571.0000	529.0
PolyLine	9	11	10	6	10	11	7362	7361.7	0.0082	589.0000	529.0
PolyLine	10	13	11	9	13	13	1500	1500.3	0.0060	580.0000	571.0
PolyLine	11	14	12	9	13	14	3849	3848.9	0.0073	599.0000	571.0
PolyLine	12	16	13	12	13	16	2135	2134.6	0.0094	619.0000	599.0
PolyLine	13	15	14	12	13	15	9678	9677.5	0.0084	680.0000	599.0
PolyLine	14	19	15	14	13	19	84	84.3	0.0000	680.0000	680.0
PolyLine	15	18	16	14	13	18	8201	8201.2	0.0048	719.0000	680.0
PolyLine	0	0	17	8	9	21	4108	4107.8	0.0046	538.0000	519.0
PolyLine	0	0	18	19	9	22	59	58.7	0.0171	520.0000	519.0
PolyLine	0	0	20	18	14	20	16	16.2	0.0000	520.0000	520.0

Figure IV.26 : La table des attribues du fichier des cours d'eau avec les nouvelles longueurs calculées.

**Conclusion**

Cette étude (schématisation du bassin) nous permet d'importer notre bassin vers le logiciel HEC-HMS, afin de simuler notre pluie et débit de la région.

Toutes les étapes citées ci-dessus sont nécessaire même obligatoire, chaque étape est traitée avec ordre, et chaque élément des tables attribue se trouve dans un fichier « fichier.Map ».

Ce fichier permet au logiciel HEC-HMS de procéder à ces étapes ainsi de faire son calcul et la représentation des graphes (histogramme, hydrogramme,.....) selon les caractéristiques des tables.

Dans notre étude toutes les étapes ont été effectuées avec succès, et notre bassin a été importé dans le HEC que nous traiterons dans le chapitre suivant.

## Chapitre V : Application du HEC-HMS sur le bassin versant de Sidi Bel Abbès

### Introduction

Le modèle hydrologique HEC-HMS permet la simulation des événements averses crues observés au bassin de Sidi Bel Abbès et relatives à un événement de forte pluie. Le but de ce travail est de se familiariser avec le fonctionnement de ce modèle.

Pour effectuer la simulation, il est nécessaire d'avoir une base de données pour caractériser notre bassin versant, les principales étapes de la simulation sont :

- Démarrage d'un nouveau projet ;
- Définition du modèle de bassin ;
- Données de la station météorologique ;
- Définition du modèle de précipitation ;
- Définition des paramètres de control de la simulation ;
- Création et exécution d'une simulation ;
- Visualisation des résultats ;
- Calage des résultats.

### I- Préparation des entrées du modèle HEC-HMS

Avant de procéder à l'application du modèle au bassin de Sidi Bel Abbès, il est nécessaire de procéder à la préparation des entrées du modèle, ces entrées :

- Modèle de bassin (fichier.map et fichier .basin) ;
- Coordonnées de la station de Sidi Bel Abbès en coordonnées Lambert ;
- Événements pluvieux (Pluies et Débits) ;

Données disponibles au niveau de ce travail :

- Les données des pluies horaires de 1972 à 1994 ;
- Débit horaire de toute l'année 1984 sur la station de Sidi Bel Abbès ;
- Quelques paramètres du sol.

Chaque donnée représente un élément très essentiel dans l'application, les caractéristiques du sol ainsi que les pluies horaires pour que le logiciel calcul l'hydrogramme de crue, et enfin les débits horaires pour le calage du modèle, c'est-à-dire ; il compare l'hydrogramme calculé avec l'hydrogramme observé.

#### **a) Procédure d'importation**

Une fois toutes les étapes effectuées sur le Hec-GeoHms, nous devons importer notre bassin versant.

En ouvrant la fenêtre principale du HEC-HMS, on appuie sur « Basin model import », on donne le chemin établis auparavant et la, le bassin sera importer sur la fenêtre principale du HEC.

Une fois le bassin importer, on retrouve juste la légende de HMS pour retrouver notre bassin, il faudra importer un fichier map, qui a été créer dans le chapitre précédent.



Figure V.1 : Procédure d'importation du bassin.

**b) Fichier à importer**

➤ Le schéma du modèle de bassin: Le schéma du modèle de bassin est la représentation du modèle hydrologique du bassin et de ses éléments (biefs, jonctions....) et leurs connectivités ;

➤ Le Fichier carte de fond (fichier.map): Ce fichier comprend l'information géographique des frontières des sous bassins et les alignements des cours d'eau dans un fichier texte qui peut être lu par HMS.

**c) Importation du modèle de bassin dans HEC-HMS**

Les deux fichiers ainsi créés sont importés dans HEC-HMS et servent pour la création du modèle du bassin, le résultat d'importation est illustré dans la (figure V.2).

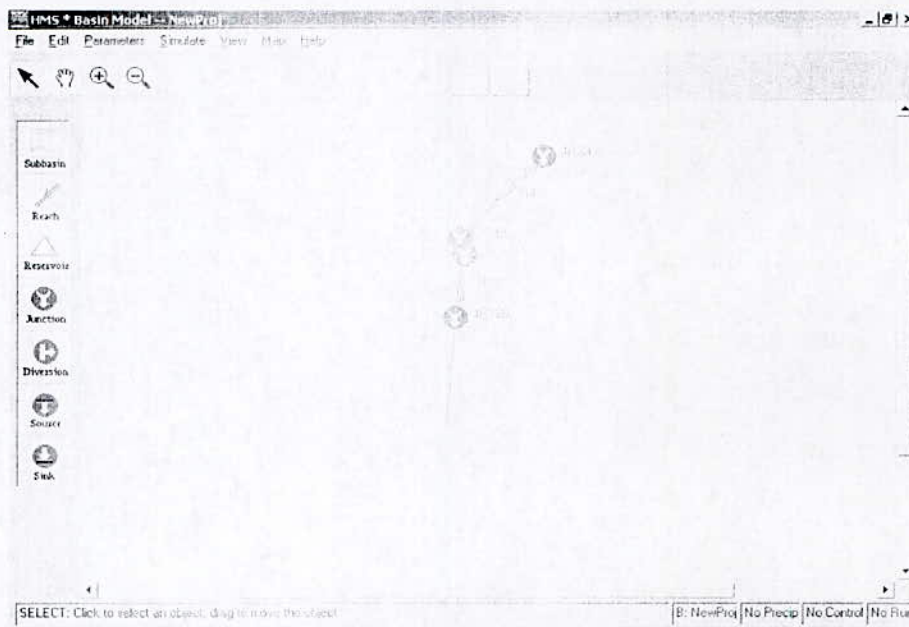


Figure V.2 : Importation du bassin à HMS.

## II. Estimation des paramètres théoriques

Ils dépendent essentiellement du type des sols et du type du couvert végétal.

Par occupation de sol, on sous-entend la couverture végétale ainsi que le type du sol constituant les sous bassins de Sidi Bel Abbes.

Comme on ne dispose pas de cartes numérisées de l'occupation des sols, on a juste une image qui est représentée ci-dessous, qui a été représenté par l'ingénieur de l'ANRH, telle que l'occupation des sols n'est pas déterminé, car il faudrait y aller sur terrain pour pouvoir distinguer chaque partie et chaque couleurs.

D'après la figure V.3, on remarque des couleurs, cela signifie chaque couleur avec une occupation, donc on définit :

- Le blanc représente un sol nu, rocheux ;
- Le Bordeau représente un sol travaillé ;
- Le vert représente la végétation ;
- Le rose représente les bâtis.

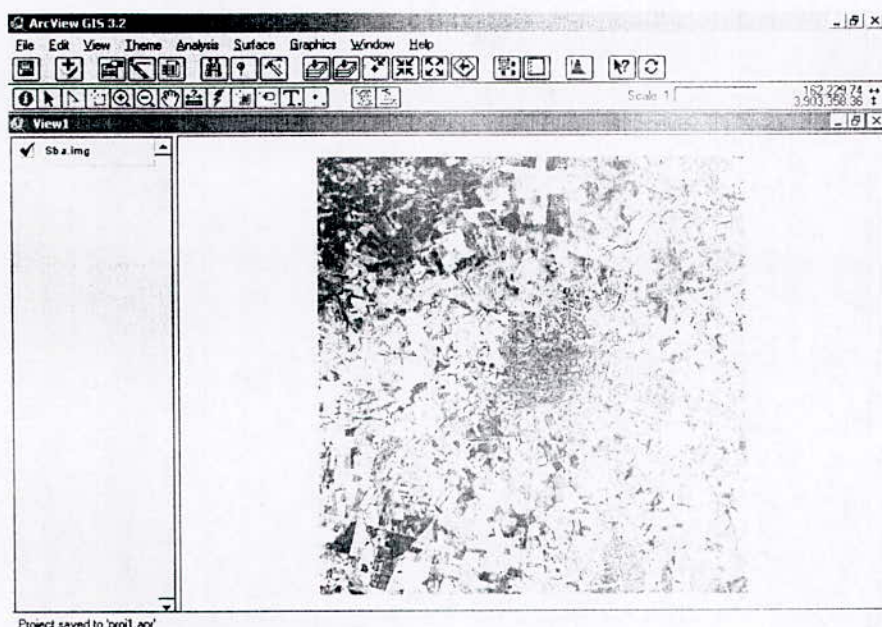


Figure V.3 : Occupation des sols.

### a) les sous bassins

On ne peut pas parler ici d'un choix de méthode car la méthode dépend des données et des connaissances sur le terrain de chaque sous bassin.

Pour cela nous avons opté pour des méthodes simples qui sont représentées sur chaque sous bassin comme suit:

- Pour les pertes (loss rate) → Méthode « perte initiale à taux constant » :
  - Les pertes initiale (représentées en inch),
  - Le taux de pertes (représentés en inch/ heure)
  - Imperméabilité (en %).

Telle que : 1 inch=0.025 m.

- Pour le ruissellement direct (Transform) → Méthode « Clark » :

- Le temps de concentration en heure ;
  - Le coefficient de stockage en heure.
- Pour l'écoulement souterrains : (Baseflow), on a considéré qu'il n'y a pas d'infiltration et que le sol est saturé donc on a mis « noBaseflow ».

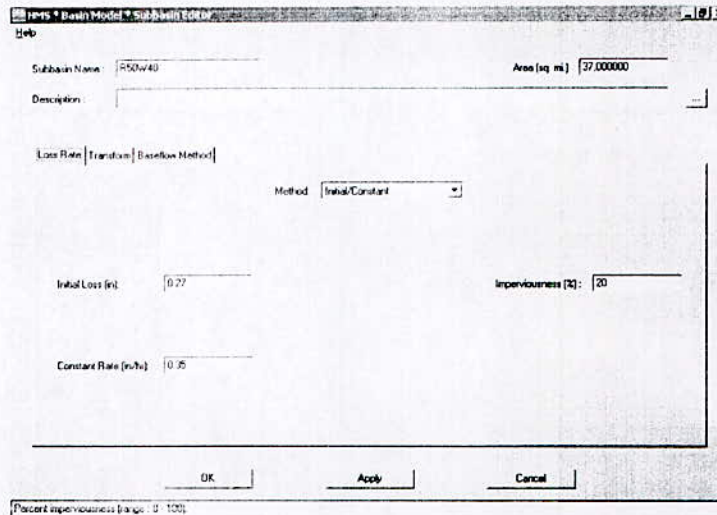


Figure V.4: Fenêtre des sous bassin.

**b) Modèle météorologique**

On a utilisé la méthode « Use Hyetograph », qui est celle de l'hydrographe, car nous disposons que de données de précipitations horaires dans chaque sous bassin.

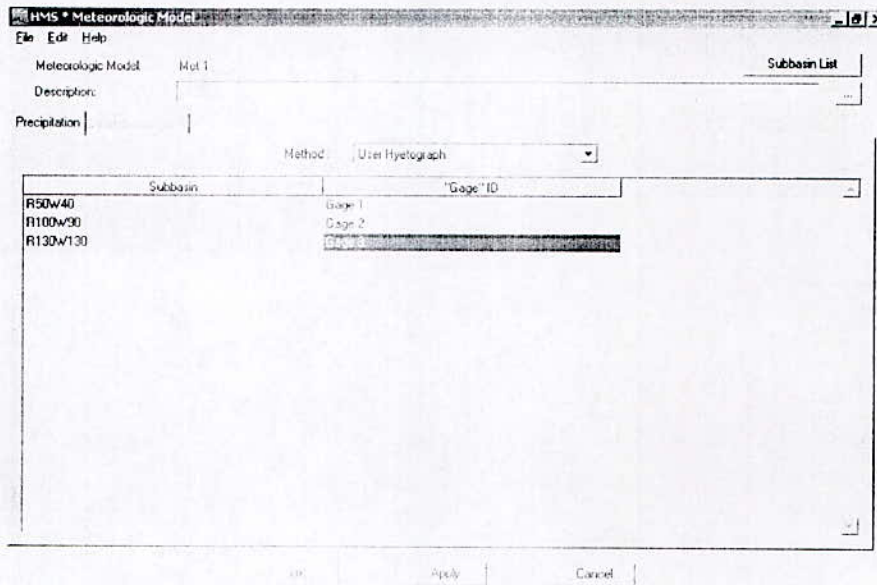


Figure V.5: Modèle météorologique.

**c) Spécification des contrôles**

Nous devons introduire la date et l'heure de prise de ces précipitations qui date de un jour (24 h) avec un pas de temps horaire.



D'après les données obtenues au niveau de l'ANRH qui date de 1972-1994 nous avons opté pour les précipitations de la journée ou il y a eu une plus grande pluviométrie qui est celle de 10-11 Novembre 1984.

On a voulu étayer la crue pour deux à trois jour, malheureusement notre logiciel HEC-HMS simule le comportement d'une seule journée à forte pluie.

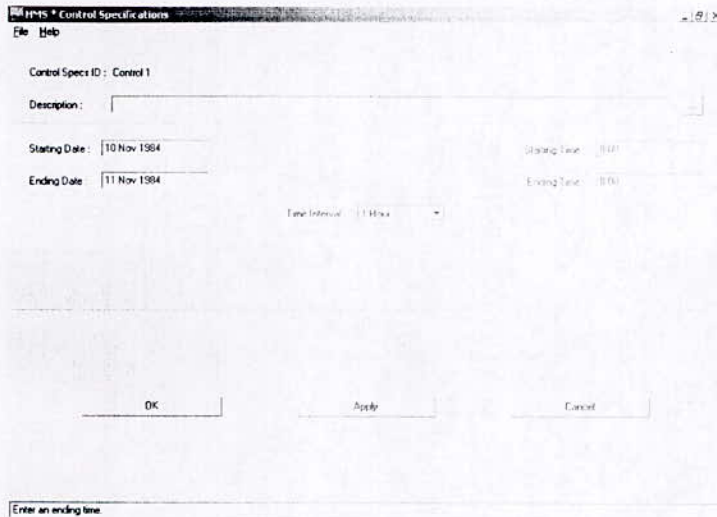


Figure V.6 : la Fenêtre des spécification de contrôle.

d) Introduction des précipitations

Pour pouvoir simuler, nous devons introduire les précipitations, de telle sorte à calculer les hydrogrammes de crues, avec un pas de temps très court.

Nous avons introduits trois stations de données, selon le nombre de sous bassin. Chaque sous bassin doit contenir une pluviométrie.

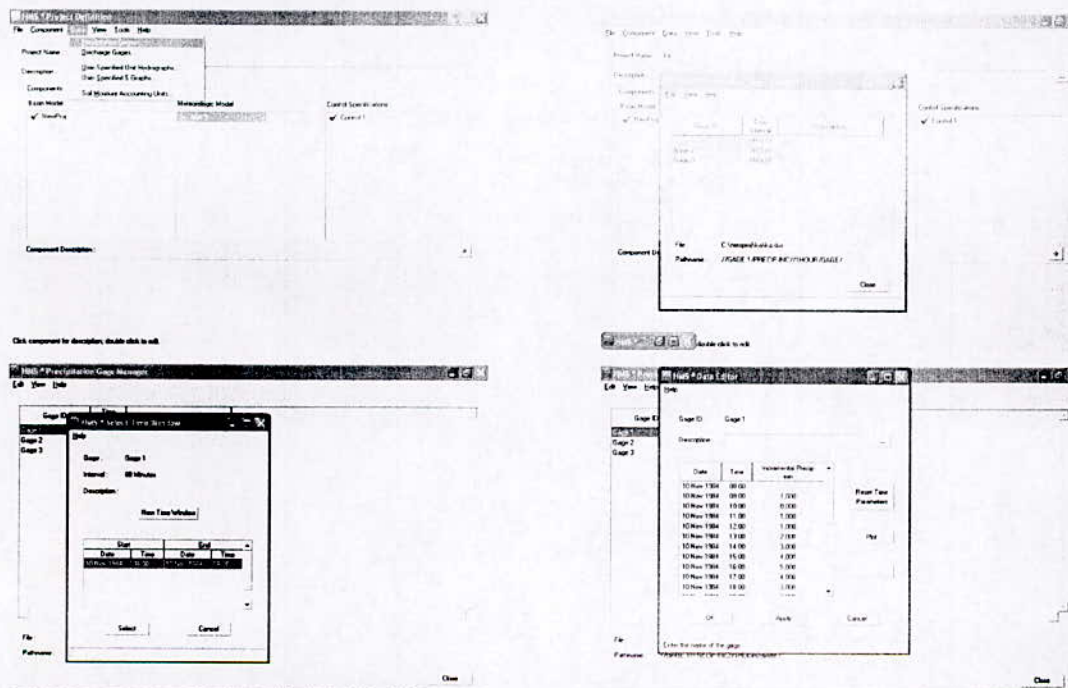


Figure V.7: Etapes d'introduction des précipitations horaires.

Nous pouvons ici voir, après l'introduction des données des précipitations, les histogrammes des pluies représentés ci-dessous :

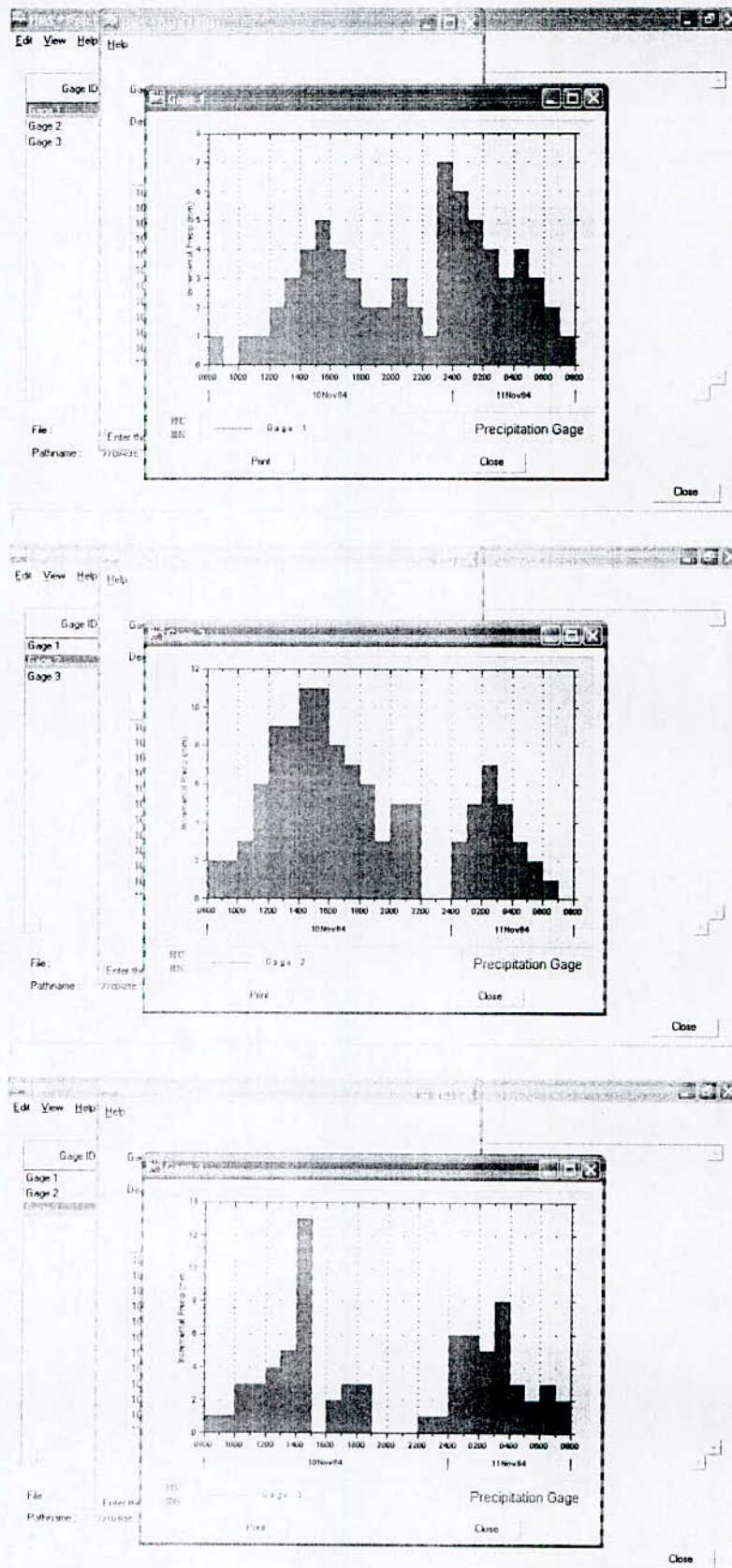


Figure V.8 : Les histogrammes des pluies horaires dans chaque sous bassins.

### III. Visualisation des résultats

Après que toutes les données sont introduite, nous devons exécuter les estimations apporter à notre bassin.

#### a) Exécution des paramètres

On sélectionne notre bassin d'étude dans la fenêtre « Run Manager », pour qu'il visualise les paramètres d'entrés et pour qu'il calcul l'hydrogramme de crue dans différents éléments dans le bassin versant.

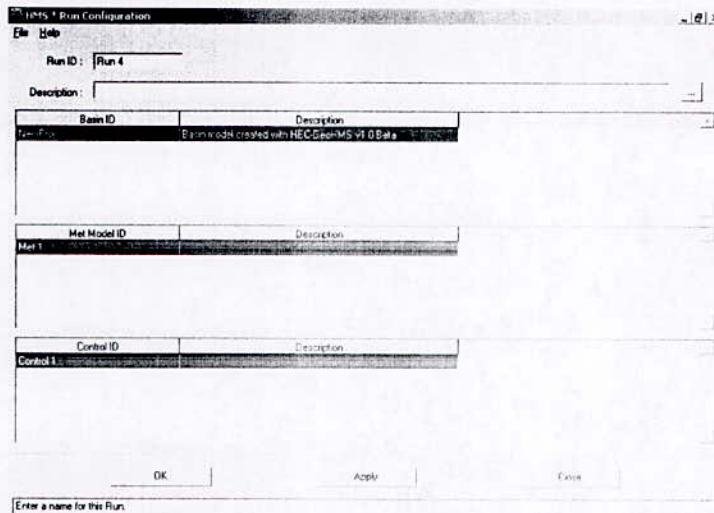


Figure V.9: Selectionnement du bassin à exécuter.

Une fois le selectionnement lancé, le logiciel récupère le nombre de fautes effectuées pendant l'introduction des données ou les méthodes choisies, et s'il ne trouve pas d'erreur, donc on pourra visualiser les graphes obtenus.

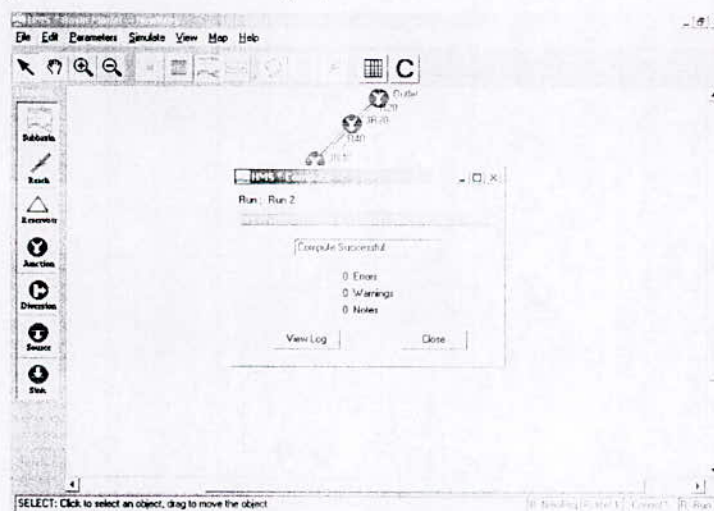


Figure V.10 : Exécution des données introduite à 100 %.

#### b) Résultats de la simulation

Les résultats peuvent être visualisés de deux manières :

- En utilisant le logiciel HecDssVue : Ce logiciel qui est téléchargeable sur Internet et nous permet de visualiser soit dans des tableaux ou dans des graphes, les données

enregistrées dans les fichiers DSS (Base de données de HEC-HMS). L'avantage de ce logiciel est qu'il nous permet aussi d'enregistrer les résultats de la visualisation dans des fichiers afin qu'ils puissent être lus par les modules de pré-traitement des modèles hydrodynamiques.

- En utilisant l'écran du modèle de bassin en chaque élément de bassin (les jonctions et les sous-bassins) sous forme :
  - De graphe (graph) ;
  - De tableau récapitulatif des résultats (summary table) ;
  - De tableau relatif aux résultats calculés à chaque pas de temps (Time Series Table).

Dans notre cas d'étude, nous avons opté à la deuxième méthode qui est démontré sur la figure suivante :

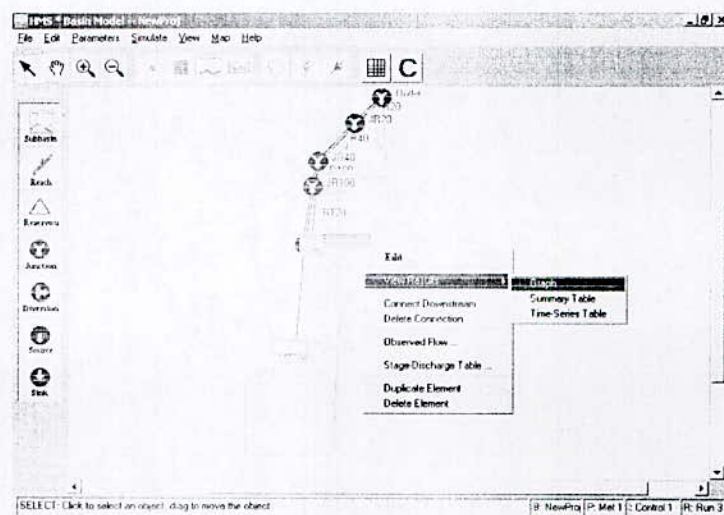


Figure V.11: Visualisation des résultats sur graphe.

### c) Graphes obtenus

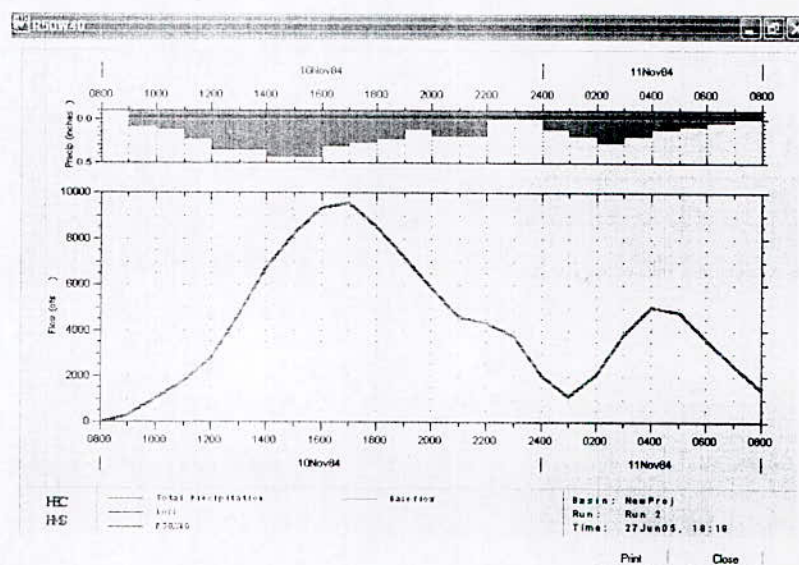


Figure V.12: Visualisation de l'hydrogramme de crue du sous bassin de Sidi Bel Abbas.

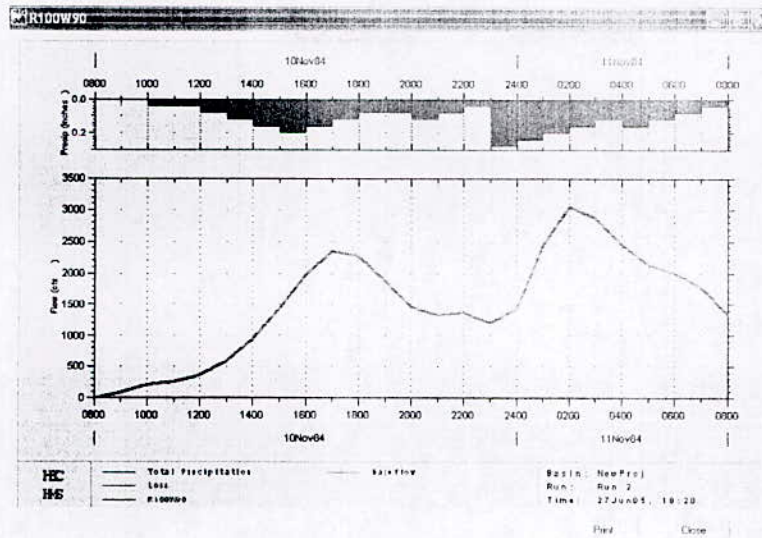


Figure V.13 : Visualisation de l'hydrogramme de crue au sous bassin du milieu.

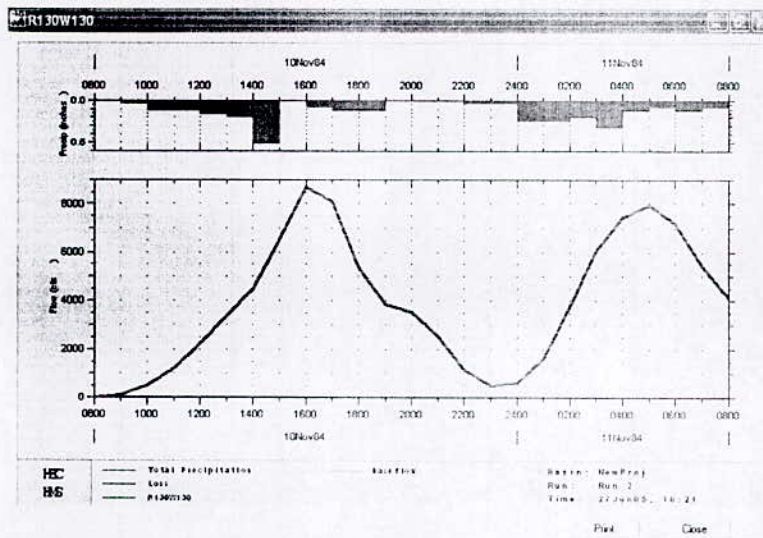


Figure V.14 : Visualisation de l'hydrogramme de crue dans le sous bassin inférieur.

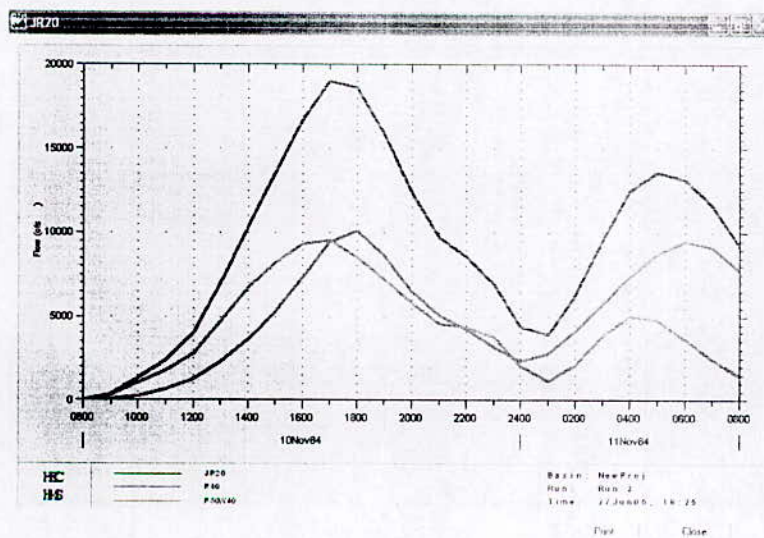


Figure V.15: Visualisation de l'hydrogramme de crue de l'exutoire.

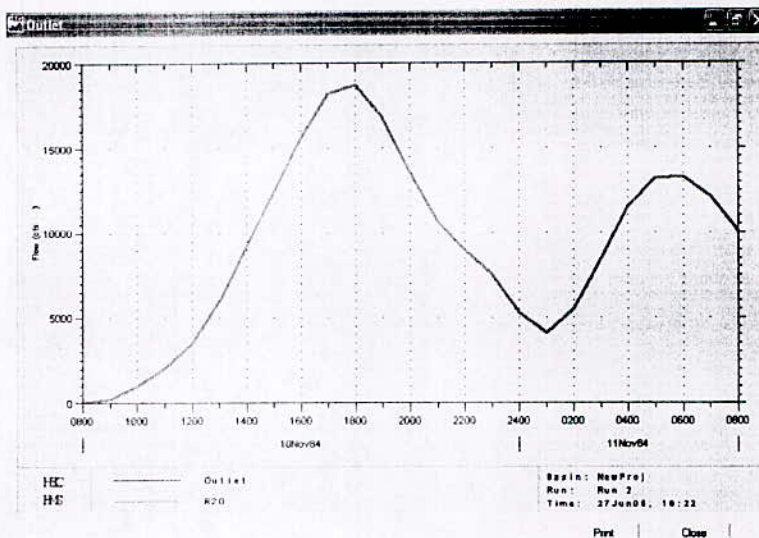


Figure V.16 : L'hydrogramme de crue résultant à l'exutoire.

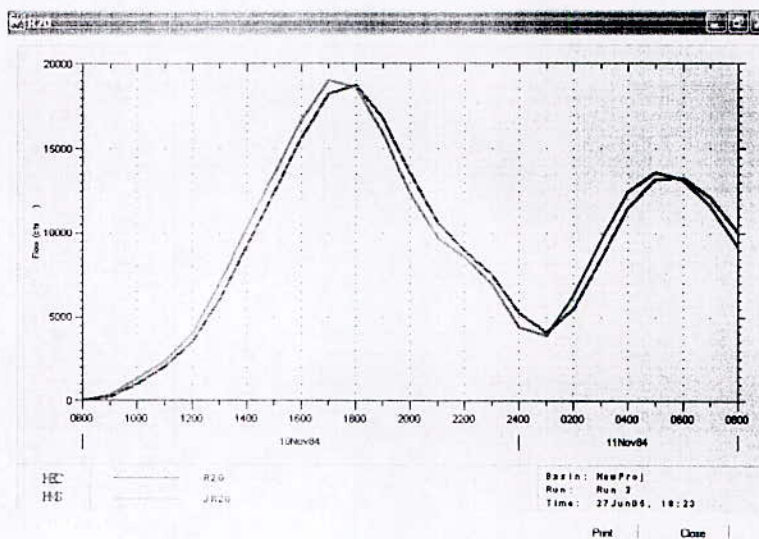


Figure V.17 : L'hydrogramme de crue du cours d'eau R20.

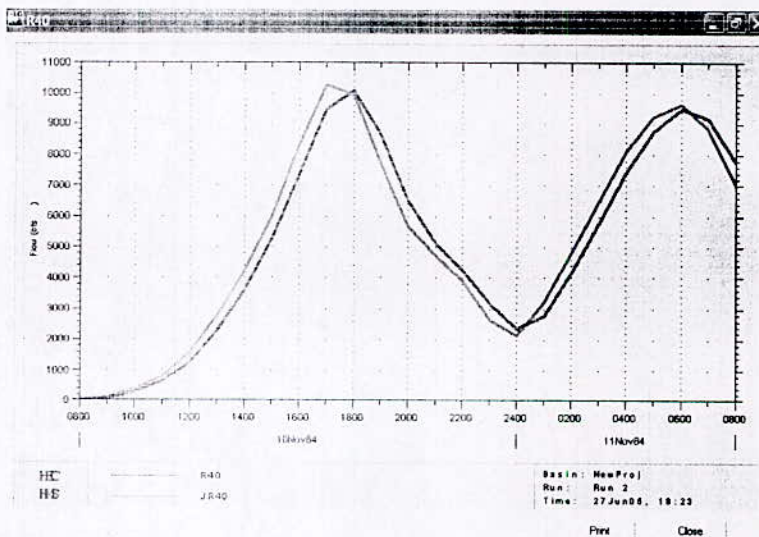


Figure V.18 : L'hydrogramme de crue du cours d'eau R40.

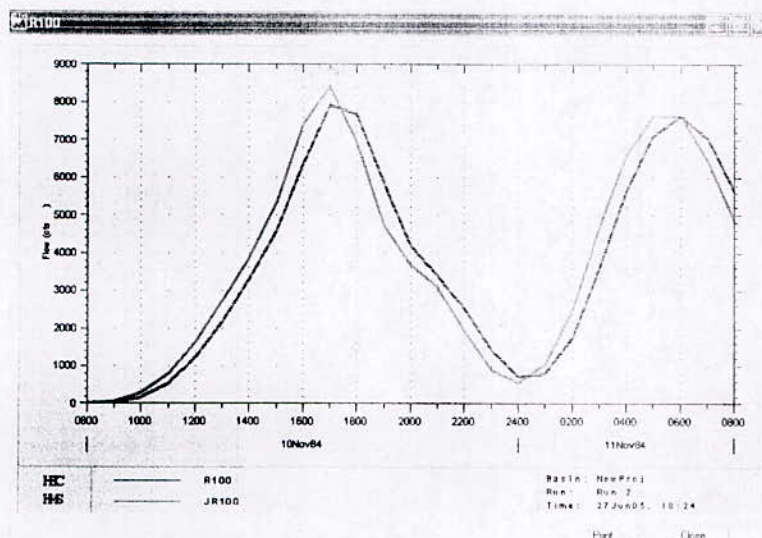


Figure V.19 : L'hydrogramme de crue du cours d'eau R100.

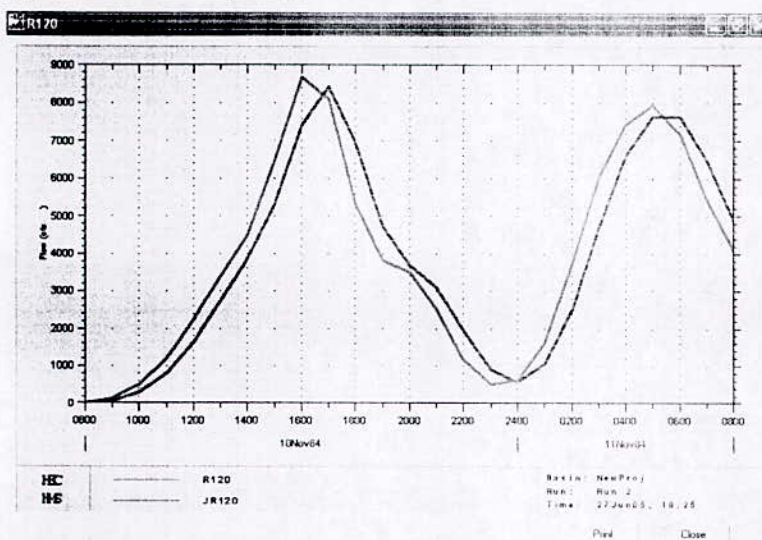


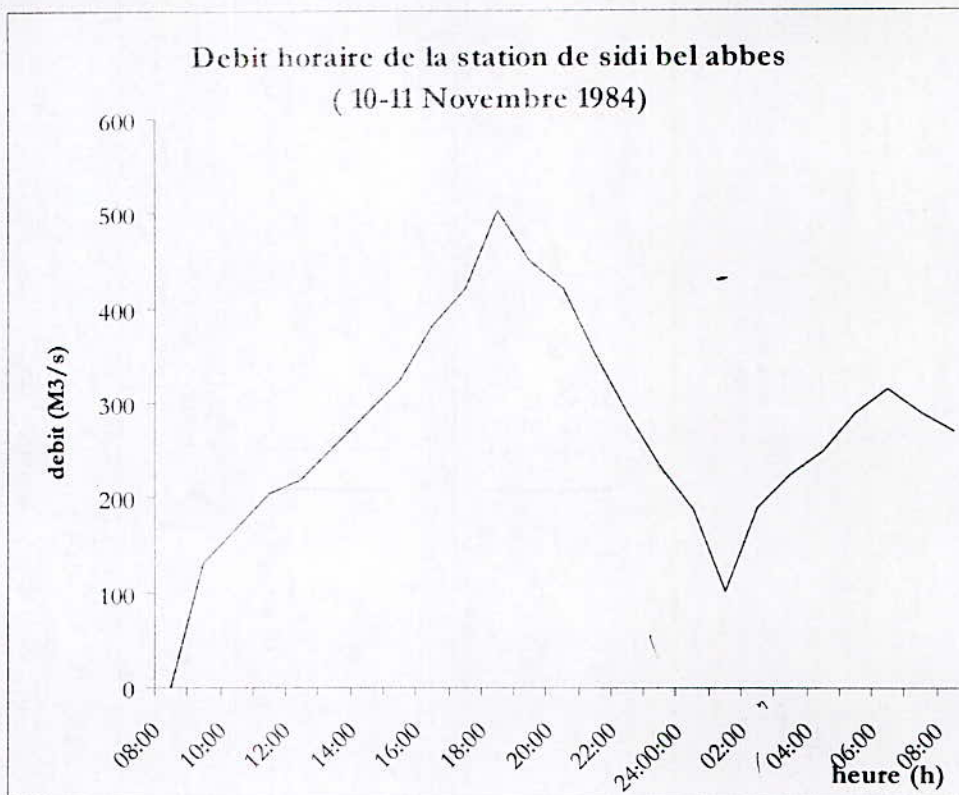
Figure V.20 : L'hydrogramme de crue du cours d'eau R120.

#### IV. Calage du modèle

On se sert dans ce cas d'un hydrographe observé et le logiciel HEC-HMS compare cet hydrographe à celui qu'il a calculé.

Ce calage s'effectue en trois étapes :

- Créer une simulation d'optimisation en choisissant un modèle de bassin, un modèle météorologique, ainsi qu'un modèle de contrôle ;
- Créer et configurer le premier essai de calage en choisissant l'endroit où va se faire l'optimisation, la fonction mathématique qu'il va calculer, l'écart entre les hydrographes observés et calculés,..... ;
- Caler le modèle.



Chapitre V.21 : Représentation du débit mesuré et observé sur la station de Sidi Bel Abbès.

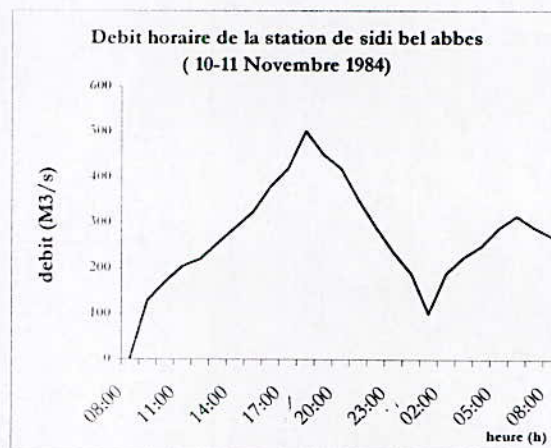
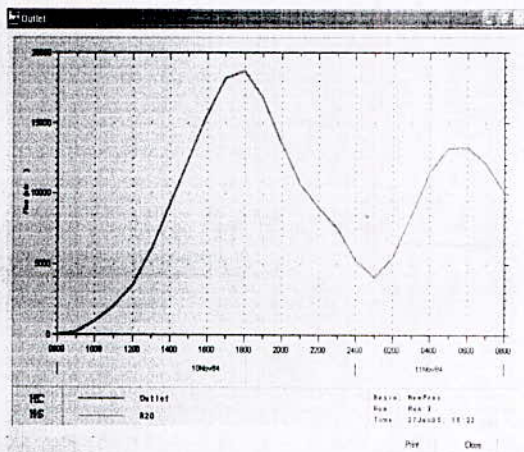


Figure V.22 : Représentation de l'hydrographe calculé et l'hydrographe observé

**Conclusion**

Notre étude a apporté des résultats satisfaisants au niveau des débits. Nous remarquons dans les graphes des hydrogrammes de crues qu'il y a deux pics, cela correspond à une pluie complexe, que ce soit dans l'observé ou le calculé. On peut dire que le logiciel utilisé est performant, on aurai aimé utiliser toutes les méthodes et comparer les résultats et distinguer la meilleure méthode, mais le manque de données et le temps nous a empêché.



## Conclusion générale

Le logiciel utilisé offre une grande liberté dans la modélisation du bassin versant grâce aussi bien aux nombreux éléments composant le bassin versant, qu'à la variété des théories proposées pour modéliser le ruissellement, les infiltrations, l'écoulement en rivière, ou encore la répartition des pluies.

La modélisation de la réponse du bassin versant de Sidi Bel Abbas soumis à un phénomène pluvieux a apporté des résultats satisfaisants au niveau de l'exutoire et dans chaque sous bassin notre calage avec l'observé le montre bien.

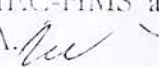
L'une des difficultés de la modélisation hydrologique avec HEC-HMS est celle de la préparation de ses données, tels que le modèle du bassin et le modèle météorologique. Cette étape a nécessité l'intervention du SIG (Système d'Information Géographique), avec ses extensions (3D Analyst et HEC-GeoHM) pour générer le modèle du bassin.

Le principal problème rencontré dans cette modélisation est d'avoir les données des pluies horaires dans chaque sous bassin.

Il aurait été intéressant d'utiliser toutes les méthodes concernant le HEC, d'aboutir à des résultats, faire une comparaison entre les méthodes et de citer les meilleures méthodes d'application, mais par défaut de manque de données, et du temps aussi nous avons utilisé une seule méthode.

On espère que ce document sera nécessaire pour les étudiants, afin de permettre d'utiliser d'autres méthodes de la simulation, ou bien appliquer toutes les méthodes, et de se pencher sur d'autres logiciels hydrologiques qui permettent de faire une bonne étude hydrologique.

## Références bibliographiques

- [1] Demmak, A. (2000), « Etude du réaménagement hydro agricole des périmètres de Sidi Bel Abbas ». ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques), Alger.
- [2] Gaume, E. (2000), « Cycle de l'eau et modélisation pluie-debit ». PDF, Ecole Nationale des Ponts et des Chaussées, Paris.
- [3] Gomez, E. (2002), « Modélisation intégrée sur le bassin de la Seine ». Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- [4] Hasnaoui, Z. (2003), « Application du HEC-HMS sur le bassin versant de Foun Tillich ». Thèse de doctorat, Rabat, MAROC.
- [5] Henine, H. (2005), « Interface entre un modèle hydrologique /modèle hydrodynamique au sein d'un système d'information intégré sous Web incluant les SIG ». Thèse de magister, INRIA-ENP.
- [6] Ider, K. (2004), « Modélisation hydrologique du cours d'eau de l'oued de Soummam ». Thèse de magister, INRIA, Paris.
- [7] Lahlah, S. (1997), « Introduction sur l'étude des inondations en Algérie journées d'études techniques hydrologique ». ANRH, Alger.
- [8] Lemieux, P. (2001), « HEC-HMS à l'aide d'un exemple ». Faculté de génie civil, Université de Sherbrooke, USA. 
- [9] Refsgaard, J. (1995), « Computer models of watershed hydrology, chapitre MIKE SHE ». Water resources publications, Highlands, USA.
- [10] US Army Corps of Engineers. (2000), « Geospatial Hydrologic modelling extension HEC-GeoHMS ». Hydrologic Engineering Center, 609 second street, DAVIS.
- [11] Vauchui, M. (1999), « Modélisation des écoulements d'eau dans le milieu naturel ». PDF, Grenoble, France.

## ملخص:

مشكل الفيضانات دائم و يشمل العالم كله خاصة الجزائر . في هذه الدراسة اهتمنا بمنطقة سيدي بلعباس لأنها منطقة معرضة للفيضانات و لتجنب هذه الفيضانات قمنا بدراسة الوجه الهيدرولوجي لهذه المنطقة باستعمال نموذج HFC/HMS (نموذج امريكي يستعمل لاعطاء المنحنى الذي يخص مسار الماء و الى أي درجة يصل مستوى الماء ) . و استعملنا ايضا نموذج ARCVIEW و HECGEOHMS لمعرفة مميزات هذه المنطقة ولقد حصلنا على نتائج جيدة هذا بمقارنتها مع المنحنى الحقيقي الذي برهن عليه في هذه الدراسة ، ونستخلص أن هذا النموذج الهيدرولوجي جيد و يمكن استعماله في كل المناطق و كل الطرق الموجودة فيه .

**الكلمات المفتاحية:** النموذج الهيدرولوجي، HFC/HMS، ARCVIEW، HECGEOHMS .

## Résume :

Le problème des inondations est persistant et ne cesse de faire des ravages sur tout le globe particulièrement en Algérie.

Pour déterminer les zones inondables on s'est intéressé a la wilaya de SIDI BEL ABBES, il faut faire une bonne étude hydrologique pour cela nous avons utilisé un modèle HFC/HMS (modèle américain qui simule le comportement d'un bassin versant).

Nous avons aussi utilisé les modèles ARCVIEW et HECGEOHMS pour schématiser notre bassin et réactualiser certain ouvrages hydraulique.

Les résultats obtenus sont satisfaisants vu le calage montré dans les résultats de ce PFE.

**Mots clés :** modèle hydrologique, ARCVIEW, HFC/HMS, HECGEOHMS.

## Summary:

The problem of the floods is persistent and does not cease particularly making devastations on all the sphere in Algeria.

To determine the easily flooded zones one was interested has the wilaya SIDI BEL ABBES,

it is necessary to make a good hydrological study for that we used a model HFC/HMS (American model which simulates the behavior of a catchment area).

We also used models ARCVIEW and HECGEOHMS to schematize our basin and to reactualize certain works hydraulics.

The results obtained are satisfactory considering the chock shown in the results of this PFE

**Key words:** hydrological model, ARCVIEW, HFC/HMS, HECGEOHMS